

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta strojní

Institut dopravy

Časová koordinace spojů v přestupním uzlu Ostrava – Dubina

Time Coordination of Connections in Ostrava Dubina Transit Hub

Student:

Bc. René Chyla

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. René Chyla**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie
Specializace: 30 Technologie dopravy
Téma: Časová koordinace spojů v přestupním uzlu Ostrava - Dubina
Time Coordination of Connections in Ostrava Dubina Transit Hub

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cíl práce: Navrhnout a ověřit funkčnost matematického modelu umožňujícího provozně účelnou časovou koordinaci spojů v přestupním uzlu Ostrava - Dubina.

Osnova práce:

1. Úvod - definování problému.
2. Charakteristika přestupního uzlu z pohledu identifikace přestupních vazeb.
3. Provozní limity ovlivňující časovou koordinaci.
4. Návrh matematického modelu.
5. Ověření funkčnosti matematického modelu - výpočetní experimenty.
6. Zhodnocení dosažených řešení - návrh implementace výsledků.
7. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

Černá, A.; Černý, J. Manažerské rozhodování o dopravních systémech. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014, 230 s. ISBN 978-80-7395-849-7.

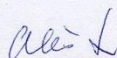
Provozní dokumentace Dopravního podniku Ostrava.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

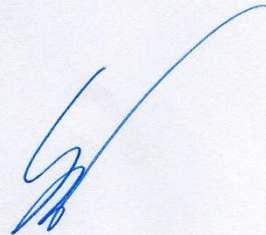
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce.
- souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:

.....

Bc. René Chyla

Adresa trvalého bydliště autora práce:

Opavská 6123/18B, Ostrava, 708 00

Poděkování

Chtěl bych na tomto místě vyjádřit velké poděkování doc. Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph.D. za veškerou pomoc během studia a při vypracování této diplomové práce, za jeho trpělivost, ochotu a cenné rady při poskytovaných konzultacích.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

CHYLA, R. Časová koordinace spojů v přestupním uzlu Ostrava – Dubina.

Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2018. 79 stran. Diplomová práce, vedoucí práce: doc. Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Předložená diplomová práce se zabývá problematikou časové koordinace spojů v přestupním uzlu Ostrava – Dubina. Úvodní kapitoly diplomové práce se věnují významu časové koordinace pro veřejnou hromadnou dopravu, následující pak popisují základní poznatky týkající se tvorby lineárních matematických modelů. V krátkosti je představen optimalizační software Xpress-IVE, pomocí kterého byly řešeny všechny optimalizační úlohy v této diplomové práci. Časová koordinace v přestupním uzlu je dále doplněna o časovou koordinaci na vybraných mezizastávkových úsecích tramvajové sítě, jsou představeny jednotlivé varianty koordinace a poté na základě upřesnění priorit zadavatele (společností KODIS) je matematický model o úsekové koordinaci upraven a validován. Za účelem vygenerování přípustného řešení je také představen matematický model eliminující infrastrukturní omezení na tramvajových obratištích.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

CHYLA, R. Time Coordination of Connections in Ostrava Dubina Transit Hub.

Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2018, 79 p, thesis head: doc. Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

This master thesis engages with problematics of time coordination of connections in transit hub Ostrava Dubina. The introductory chapters of this thesis devote the importance of time coordination for public transport, the following chapters describe the basic information relating to the creation of linear mathematical models. In shortness optimization software Xpress-IVE is described and all optimization problems are solved by this software. Time coordination in the transit hub is farther evolved by time coordination at chosen sections of tram network. Further separate versions of coordination are introduced and on this basis specified priorities of beneficiary is modified and validated mathematical model of section time coordination on tram network. To generate acceptable solution is finally introduced mathematical model specializing on infrastructural limits of turning circles of tram transport.

Obsah

Seznam použitých zkratk a značek	9
1 Úvod	12
2 Charakteristika současného stavu.....	13
3 Provozní limity ovlivňující časovou koordinaci	15
4 Teoretická východiska řešení	22
5 Návrh matematického modelu	24
5.1. Optimalizace časové koordinace spojů v přestupních uzlech	24
5.1.1. Obecná formulace problému časové koordinace v přestupních uzlech	24
5.1.2. Matematický model pro časovou koordinaci spojů v přestupním uzlu přijíždějících z jednoho nebo více směrů a odjíždějících do více směrů:	26
5.2. Obecná formulace úlohy o časové koordinaci v přestupních uzlech s taktovým vedením spojů koordinovaných linek	29
5.3. Problémy na obratištích související s časovou koordinací spojů.....	32
5.3.1. Obecný model úlohy o přidělování tramvajových linek manipulačním kolejím na obratištích.....	33
5.3.2. Obousměrný matematický model pro časovou koordinaci spojů v přestupním uzlu přijíždějících z jednoho nebo více směrů a odjíždějících do více směrů včetně přiřazení kolejí tramvajovým linkám na obratišti	37
5.4. Úseková koordinace.....	41
5.4.1. Obecný matematický model pro úsekovou koordinaci – přístup minimalizace maximálního rozestupu mezi dvěma sousedními spoji	41
5.4.2. Obecný matematický model pro úsekovou koordinaci – přístup maximalizace minimálního rozestupu mezi dvěma sousedními spoji.....	42
5.4.3. Obecný matematický model pro úsekovou koordinaci – kombinace dvou předešlých přístupů – minimalizace maximálního rozestupu a maximalizace minimálního rozestupu mezi dvěma po sobě jedoucími spoji	43
5.4.4. Výběr přístupu k úsekové koordinaci.....	45
5.4.5. Kaskádový přístup.....	45
5.4.6. Postup řešení kaskádového přístupu pro úlohu o maximalizaci minimálního rozestupu	45

6	Řešení zformulovaných modelů	47
7	Současný stav po provedených zjednodušeních	51
8	Výpočetní experimenty	53
8.1.	Vstupní údaje pro optimalizační úlohy	53
8.2.	Zápis textu programu o časové koordinaci v přestupním uzlu v programu Xpress-IVE s přiřazením kolejí jednotlivým tramvajovým linkám	54
8.3.	Varianty časové koordinace v přestupním uzlu Dubina s možnostmi časové koordinace na přilehlých úsecích	58
8.3.1.	Varianta č. 1	59
8.3.2.	Varianta č. 2	61
8.3.3.	Varianta č. 3	62
8.3.3.1.1.	Varianta č. 3.1	63
8.3.3.2.	Varianta č. 3.2	64
8.3.3.3.	Varianta č. 3.3	66
8.3.4.	Varianta č. 4	68
8.3.5.	Varianta č. 5	69
8.3.6.	Závěr k variantnímu řešení úsekové koordinace	71
8.4.	Zápis textu programu o časové koordinaci na vybraných úsecích tramvajové sítě s použitím kaskádového přístupu v programu Xpress (pro jeden směr – z přestupního uzlu Dubina)	72
9	Zhodnocení výsledků	78
10	Závěr	79
	Použitá literatura	80
	Seznam tabulek a obrázků	81
	Seznam příloh	83

Seznam použitých zkratk a značek

a_i ... maximální hodnota časového posunu příjíždějícího autobusového spoje $i \in I$,

aa_i ... nejvyšší dovolený časový posun příjezdu spoje autobusové linky $i \in I$,

at_j ... nejvyšší dovolený časový posun příjezdu spoje tramvajové linky $j \in J$,

b_{jk} ... maximální hodnota časového posunu odjíždějícího tramvajového spoje $j \in J$ do směru $k \in K$,

ba_i ... nejvyšší dovolený časový posun odjezdu spoje autobusové linky $i \in I$,

bt_j ... nejvyšší dovolený časový posun odjezdu spoje tramvajové linky $j \in J$,

c ... maximální počet tramvajových linek $i \in L$ přiřazených na kolej $r \in R$,

d ... minimální rozestup mezi dvěma tramvajovými spoji $i \in I$ v místě koordinace,

f_{ik} ... průměrný počet cestujících přestupujících z autobusového spoje $i \in I$ do směru $k \in K$,

h_{ik} ... proměnná modelující časovou ztrátu jednoho přestupujícího cestujícího z autobusového spoje $i \in I$ do směru $k \in K$ [min.],

ha_{ij} ... časová ztráta cestujícího přestupujícího ze spoje autobusové linky $i \in I$ na spoj tramvajové linky $j \in J$,

ht_{ji} ... časová ztráta cestujícího přestupujícího ze spoje tramvajové linky $j \in J$ na spoj autobusové linky $i \in I$,

I ... množina příjíždějících spojů,

J_k ... množina odjíždějících spojů do směru $k \in K$

K ... množina směrů, do kterých spoje odjíždějí,

L ... množina linek, jejichž vozidla využívají obratiště,

m ... počet kolejí disponibilních na obratišti,

n ... počet tramvajových linek obsluhujících obratiště,

p ... minimální doba pobytu tramvajového spoje $i \in I$ na obratišti [min.],

q ... linkový interval [min.],

R ... množina manipulačních kolejí na obratišti,

rt_{ijr} ... proměnná zajišťující vzájemné vazby mezi proměnnými st_{ijk} a wt_{ik} ,

st_{ijr} ... rozhodnutí, zda vozidlo obsluhující spoj linky $i \in L$ přijede na kolej $r \in R$ před vozidlem obsluhujícím spoj linky $j \in L$ nebo ne

t_i ... nejdříve možná časová poloha tramvajového spoje $i \in I$ v místě koordinace,

t_{i+1} ... nejdříve možná časová poloha následujícího tramvajového spoje $i \in I$ v místě koordinace,

t_{ojk} ... nejdříve možný čas odjezdu tramvajového spoje $j \in J$ do směru $k \in K$,

t_{okv} ... nejdříve možný čas odjezdu spoje $v \in V$ do směru $k \in K$,

t_{pi} ... nejdříve možný čas příjezdu autobusového spoje $i \in I$,

t_{prest} ... konstantní přestupní doba,

$t_{prest\ i,j,k}$... přestupní doba ze spoje $i \in I$ na spoj $j \in J_k$ do směru $k \in K$,

$todt_{jv}$... nejdříve možný čas odjezdu spoje $v \in V$ tramvajové linky $j \in J$,

$toda_{iv}$... nejdříve možný čas odjezdu spoje $v \in V$ autobusové linky $i \in I$,

tpa_i ... nejdříve možný čas příjezdu spoje autobusové linky $i \in I$,

tpt_j ... nejdříve možný čas příjezdu spoje tramvajové linky $j \in J$,

tt_{ijr} ... proměnná zajišťující vzájemné vazby mezi proměnnými s_{ijk} a w_{ik} ,

V ... množina odjíždějících spojů ve zjednodušeném modelu uzlové koordinace,

wt_{ir} ... proměnná modelující rozhodnutí o přidělení tramvajové linky $i \in L$ na kolej $r \in R$,

w_i ... hodnota, o kterou se navyšuje minimální rozestup mezi dvěma po sobě jedoucími tramvajovými spoji při kaskádovém stylu [min.].

x_i ... proměnná modelující časový posun přijíždějícího autobusového spoje $i \in I$ [min.],

x_{i+1} ... časový posun následujícího tramvajového spoje $i \in I$ v místě koordinace,

x_{ir} ... časový posun příjezdu spoje linky $i \in L$ na kolej $r \in R$ vztažmo k jeho nejdříve možnému času příjezdu,

xa_i ... časový posun příjezdu spoje autobusové linky $i \in I$,

xt_{ir} ... časový posun příjezdu spoje linky $i \in L$ na kolej $r \in R$ vztažmo k jeho nejdříve možnému času příjezdu,

yt_{ir} ... časový posun odjezdu spoje linky $i \in L$ z koleje $r \in R$ vztažmo k jeho nejdříve možnému času odjezdu,

ya_i ... časový posun odjezdu spoje autobusové linky $i \in I$,

y_{ir} ... časový posun odjezdu spoje linky $i \in L$ z koleje $r \in R$ vztažmo k jeho nejdříve možnému času odjezdu,

y_{jk} ... proměnná modelující časový posun odjíždějícího autobusového spoje $j \in J$ do směru $k \in K$ [min.],

z_{ijk} ... proměnná modelující přestupní vazbu z autobusového spoje $i \in I$ na tramvajový spoj $j \in J$ do směru $k \in K$,

zat_{ijv} ... proměnná reprezentující vznik přestupní vazby ze spoje autobusové linky $i \in I$ na spoj $v \in V$ tramvajové linky $j \in J$,

zta_{jiv} ... proměnná reprezentující vznik přestupní vazby ze spoje tramvajové linky $j \in J$ na spoj $v \in V$ autobusové linky $i \in I$.

1 Úvod

Časová koordinace spojů ve veřejné hromadné dopravě je důležitá zejména z toho důvodu, aby se zvyšovala spokojenost cestujících. Toho lze docílit například tak, že nejvíce využívané spoje provozované na dopravní síti na sebe budou navzájem v uzlech navazovat a časová ztráta cestujících přestupujících v daném uzlu tak bude minimální. V případě úsekové koordinace jde pak o to, aby byla na úsecích obsluhovaných více linkami zachována co nejrovnoměrnější nabídka jednotlivých spojů jedoucích stejným směrem.

Ne vždy je ovšem nutno klást důraz na časovou koordinaci spojů, jelikož v podmínkách velkých měst a jeho hustě obydlených částí je nabídka spojů zejména v pracovních dnech poměrně vysoká, a tak běžně k značným časovým ztrátám cestujících nedochází. Časová koordinace však začíná mít svůj hlavní význam v době, kdy je nabídka spojů nižší než v běžný pracovní den, tzn. v době přepravního sedla, ve dnech pracovního volna, ve svátky nebo zejména během nočních hodin.

Diplomová práce je zaměřena na časovou koordinaci spojů městské hromadné dopravy Dopravního podniku Ostrava a má dva hlavní cíle. Prvním z nich je vytvořit časovou koordinaci spojů v přestupním uzlu Ostrava-Dubina s návazností na úsekovou koordinaci na přiléhajících úsecích. K řešení bude použito lineární programování, navržené modely budou řešeny v optimalizačním software Xpress – IVE.

2 Charakteristika současného stavu

Jak již bylo zmíněno v úvodu, je hlavním cílem této diplomové práce časová koordinace spojů v přestupním uzlu Ostrava – Dubina. Tu je možné zajistit jak mezi linkami Dopravního podniku Ostrava navzájem, tak mezi příměstskými autobusovými linkami právě na tramvajové a autobusové linky dopravního podniku. V této diplomové práci bude věnována pozornost zejména návaznosti městských linek, tedy koordinace přestupů z autobusové dopravy na tramvajovou a naopak. Přestupní uzel disponuje tramvajovým obratištěm se třemi manipulačními kolejemi, které jsou využívány pěti tramvajovými linkami, pro které je charakteristický linkový interval 20 minut.

Tramvajové linky zajišťují cestujícím přepravu do třech městských částí, přičemž časová koordinace by měla proběhnout právě na ty linky, jejichž doba jízdy je do těchto městských částí nejkratší. Aktuální příjezdy a odjezdy tramvajových linek jsou uvedeny v Tabulce 1 a Tabulce 2.

Přestupní uzel obsluhují také tři autobusové linky, které obsluhují další dvě městské části Ostravy, přičemž na jedné z nich je zajištěn pravidelný interval 40 minut, u dalších dvou autobusových linek, které obsluhují tutéž městskou část, je zajištěn dvouhodinový a střídavě čtyřicetiminutový a osmdesátiminutový interval. Příjezdy a odjezdy autobusových linek jsou uvedeny v Tabulce 3 a Tabulce 4.

Linka	Výchozí zastávka	Čas příjezdu
15	Výškovice	12:01
1	Hlavní nádraží	12:04
17	Vřesinská	12:05
12	Hranečník	12:08
3	Poruba vozovna	12:18

Tabulka 1: Aktuální příjezdy spojů tramvajových linek do přestupního uzlu Dubina v době 12.00 – 12.20

Linka	Cílová zastávka	Čas odjezdu
1	Hlavní nádraží	12:01
12	Hranečník	12:02
17	Vřesinská	12:08
3	Poruba vozovna	12:13
15	Výškovice	12:16

Tabulka 2: Aktuální odjezdy spojů tramvajových linek do přestupního uzlu Dubina v době 12.00 – 12.20

Další příjezdy a odjezdy tramvajových spojů jsou posunuty vždy o 20 minut.

Linka	Výchozí zastávka	Čas příjezdu
26	Stará Bělá	11:58
55	Nová Bělá	11:59
26	Stará Bělá	12:38
55	Nová Bělá	12:39
59	Stará Bělá	13:18
55	Nová Bělá	13:19
26	Stará Bělá	13:58
55	Nová Bělá	13:59

Tabulka 3: Aktuální příjezdy autobusových spojů do přestupního uzlu Dubina v době 11.40 – 14.00

Linka	Cílová zastávka	Čas odjezdu
26	Stará Bělá	11:47
55	Nová Bělá	12:21
59	Stará Bělá	12:27
55	Nová Bělá	13:01
26	Stará Bělá	13:07
55	Nová Bělá	13:41
26	Stará Bělá	13:47
55	Nová Bělá	14:21

Tabulka 4: Aktuální odjezdy autobusových spojů z přestupního uzlu Dubina v době 11.40 – 14.30

3 Provozní limity ovlivňující časovou koordinaci

Cílem koordinačních úloh tedy je, aby bylo možné na základě stanovených možných časových posunů pro jednotlivé spoje rozhodnout o případných změnách v současných časových polohách spojů tak, aby se optimalizovala hodnota zvoleného optimalizačního kritéria. Při stanovení časových intervalů, v nichž je možno se spoji posouvat, je nutno také pochopitelně přihlížet k provozním možnostem dopravců, jejichž vozidla dané spoje obsluhují a také k zachování již existujících přestupních vazeb v daném uzlu, které jsou cestujícími využívány.

V matematické teorii dopravy rozlišujeme tři typy koordinace – koordinaci uzlovou, koordinaci úsekovou a koordinaci uzlově-úsekovou. Základní rozdíl mezi uzlovou a úsekovou koordinací spočívá v optimalizované veličině, podle jejíž hodnoty usuzujeme na kvalitu získaného řešení. V případě uzlové koordinace je optimalizačním kritériem zpravidla celková časová ztráta přestupujících cestujících, v případě úsekové koordinace je optimalizačním kritériem zpravidla interval mezi dvěma po sobě jedoucími spoji ve stejném směru, přičemž je požadováno, aby hodnoty těchto intervalů byly pokud možno stejně velké (rovnoměrnost nabídky spojů v čase). Je se však možno i setkat s čekáním cestujících, ovšem v takových případech se předpokládá, že cestující přicházejí na zastávky veřejné hromadné dopravy v režimu „bez znalosti jízdního řádu“.

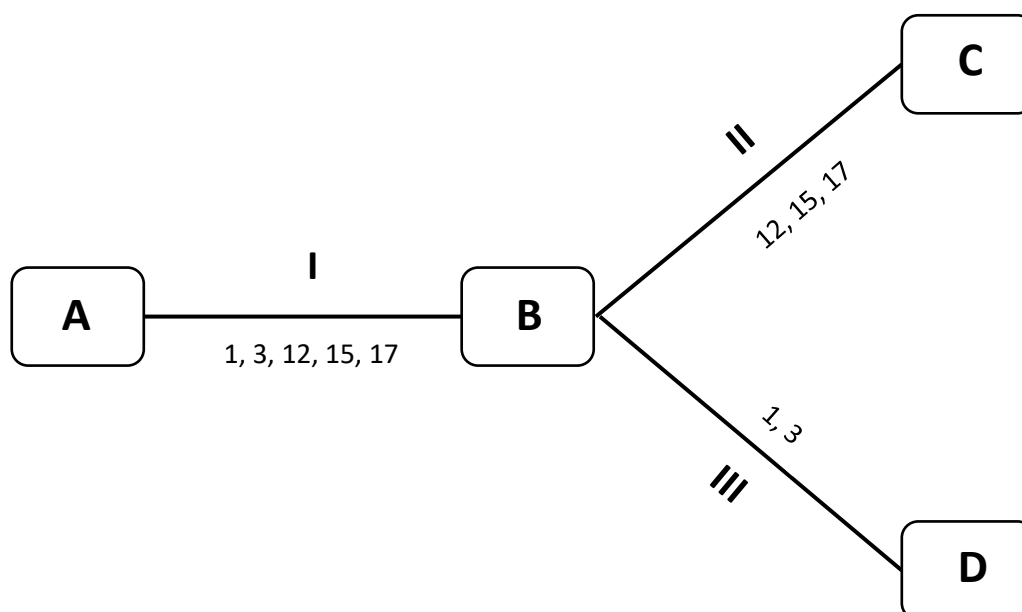
Největší komplikace nastávají v situaci, kdy má být prováděna úseková koordinace ve více úsecích současně. V reálném dopravním provozu běžně dochází k situaci, že časové polohy jednotlivých spojů obsluhujících stejný úsek jsou nerovnoměrně rozloženy v čase. Příčiny časové nerovnoměrnosti jsou dvojího charakteru. První skupinu příčin tvoří příčiny vyplývající z technologických specifik provozu a druhou skupinu tvoří vedení spojů v neopodstatněných časových polohách. Příkladem příčiny nerovnoměrnosti zařazené v první skupině je neexistence vhodného intervalu dopravy při zachování elementární časové jednotky jedné minuty. Příkladem příčiny nerovnoměrnosti zařazené do druhé skupiny je potom větvení sítě za sledovaným úsekem dopravní sítě. Zatímco na prvním společně pojížděném úseku lze časové rovnoměrnosti spojů dosáhnout, na jednom z přiléhajících úseků případně více úsecích může vzniknout opačná situace, kdy rovnoměrnost spojů dodržena není.

Zatímco příčiny zařazené v první skupině bývá obtížné odstranit, příčiny zařazené do druhé skupiny jsou odstranitelné s využitím vhodných optimalizačních metod.

Výše uvedené úvahy související se vznikem časové nerovnoměrnosti budou zřejmé z následujícího příkladu. Je dán fragment sítě složený ze tří úseků, které jsou

obsluhovány pěti linkami, jež disponují pravidelným intervalem dvacet minut, který je nutno u všech dodržet. Za tímto úsekem dochází k větvení sítě, přičemž jednu z větví obsluhují tři z uvedených linek a druhou větev obsluhují zbývající dvě linky. Elementární časovou jednotkou v daných jízdních řádech je jedna minuta. Zatímco na společném úseku, který je obsluhován všemi linkami, je možno zajistit rovnoměrnou nabídku spojů (interval dopravy 4 minuty), na přiléhajících úsecích tomu tak již nelze. Zatímco na přiléhajícím úseku obsluhovaném třemi linkami budou při maximální rovnoměrnosti intervaly dopravy činit 4, 8 a 8 minut, na přiléhajícím úseku obsluhovaném dvěma linkami budou intervaly dopravy při maximální rovnoměrnosti intervaly dopravy činit 8 a 12 minut. Pokud ovšem nebude vyžadována pravidelnost spojů v čase na společném úseku obsluhovaném všemi linkami, časová rovnoměrnost na tomto úseku se sice zhorší, ale dojde ke zlepšení časové rovnoměrnosti na obou přiléhajících úsecích. V tomto případě sice nelze dosáhnout pravidelného intervalu na úseku obsluhovaného třemi linkami, tzn., že optimální intervaly dopravy by mohly být 7, 7 a 6 minut, v případě přiléhajícího úseku obsluhovaného dvěma linkami však lze dosáhnout u plné pravidelnosti intervalu dopravy 10 minut. Výše popsany případ, kdy každá linka má interval 20 minut, je víceméně případem ideálním, jelikož při různých intervalech spojů nelze dosáhnout rovnoměrné nabídky.

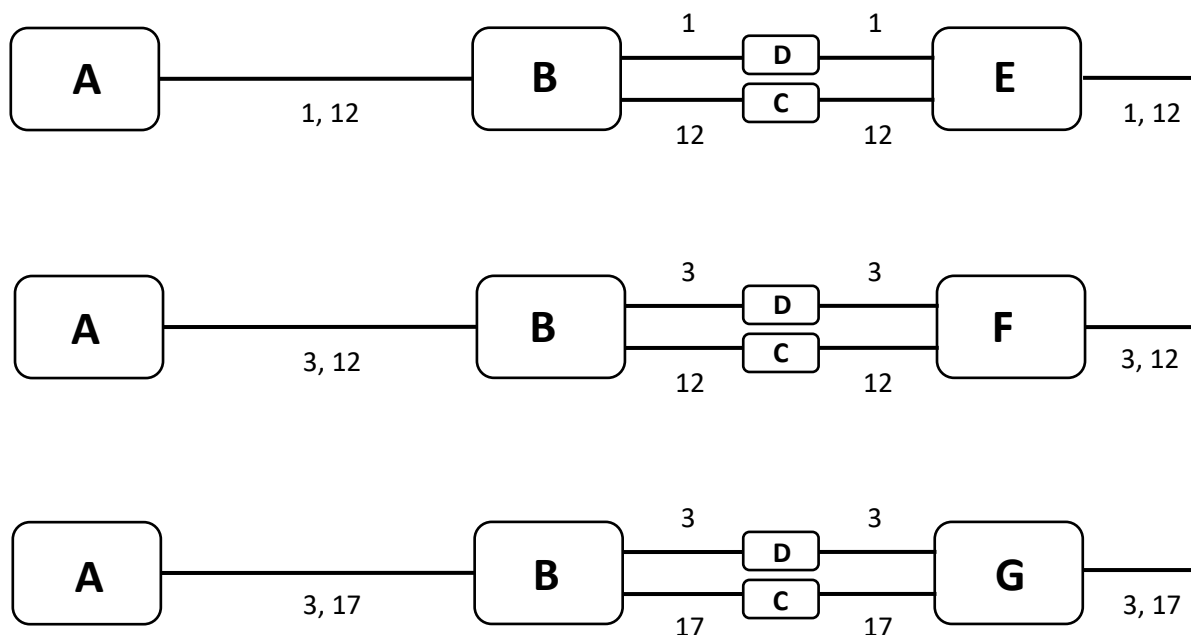
Výše popsany problém je pro názornost vyobrazen příslušným schématem na Obrázku 1, které přibližuje reálnou situaci na vybrané části tramvajové sítě Dopravního podniku Ostrava. Vrchol A reprezentuje zastávku na přestupním uzlu Dubina, která je obsluhována tramvajovými linkami 1, 3, 12, 15 a 17, a z níž by měla být zajištěna přestupní vazba na linky autobusové č. 26, 55 a 59. K větvení tramvajové sítě dochází pak na obrázku ve vrcholu B, který charakterizuje poslední společnou zastávku pro všechny tramvajové linky – Josefa Kotase (úsek Dubina – Josefa Kotase značen I). Tramvajové linky 12, 15 a 17 poté obsluhují úsek Josefa Kotase – ÚMOB Jih (označen II) a tramvajové linky 1 a 3 úsek Josefa Kotase – Hrabůvka kostel (označen III).



Obrázek 1: Schéma části tramvajové sítě

V podmínkách Dopravního podniku Ostrava nastává také případ, v němž více tramvajových linek propojuje tytéž městské části s tím, že časová dostupnost do cílové městské části je vzhledem k různému vedení tras odlišná. Společně obsluhované úseky jsou uvedeny na schématu v Obrázku 2.

Další příčinou časové nerovnoměrnosti v daném úseku může být také případ, kdy spoje dvou a více linek obsluhují na svých trasách více společných úseků, tzn. i úseků, které bezprostředně nenásledují za řešeným úsekem s tím, že doby jízdy spojů jednotlivých linek jsou do následujícího společného úseku rozdílné. V tomto případě již dále záleží na požadavcích dopravce provozujícího dané linky na dopravní síti, aby definoval, který úsek je z hlediska časové koordinace pro něj prioritní.



Obrázek 2: Společné úseky vybraných linek v rámci tramvajové sítě

Situace, kdy tramvaje stejných linek obsluhují více společných úseků, se vyskytuje i na tramvajové síti Dopravního podniku Ostrava. U řešených tramvajových linek tato situace nastává hned ve třech případech. Jak již bylo zmíněno, všechny tramvajové linky obsluhují úsek A – B (Dubina – Josefa Kotase), přičemž ve vrcholu B dochází k větvení tramvajové sítě. Linky č. 1 a 3 dále pokračují společně do vrcholu D (Hrabůvka kostel), kde dochází k dalšímu větvení sítě, odkud již tyto linky pokračují dále samostatně a na svých trasách již žádný další společný úsek neobsluhují. Ke stejné situaci dochází ale i na druhém rameni větvení ve vrcholu B, kdy linky č. 12, 15 a 17 obsluhují společný úsek až do vrcholu C, který reprezentuje zastávku ÚMOB Jih a za touto obsluhovanou zastávku již v rámci celé dopravní sítě neexistuje další úsek, který by všechny, případně dvojice těchto linek obsluhovaly společně.

Může nastat ale i situace, kdy se trasy jednotlivých tramvajových linek znovu setkávají a v rámci dopravní sítě obsluhují jednotlivé linky i další společné úseky. Tato situace nastává také na dopravní síti Dopravního podniku Ostrava, kdy kromě společného úseku A – B obsluhují dvojice vybraných linek společný úsek i v dalších částech dopravní sítě. Například trasy linek č. 1 a 12 se setkávají dále ve vrcholu E, který na dopravní síti reprezentuje přestupní uzel Náměstí Republiky, odkud pojíždějí tyto linky další společný úsek do zastávky Karolina. Prioritně se jedná o vysoce frekventovaný úsek obsluhovaný mnoha dalšími linkami, koordinace na úseku Náměstí Republiky – Karolina těchto dvou linek není příliš významná. Dalším případem je pak dvojice linek 3 a 12, které se po absolvování společného úseku A – B sice rozjíždějí do různých směrů (poslední společně obsluhovaná zastávka je Josefa Kotase, na obrázku 2 značena vrcholem B),

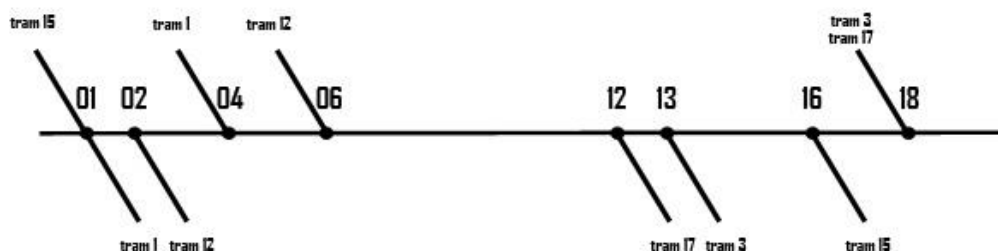
nicméně trasy těchto linek se poté znovu setkají ve vrcholu F, který reprezentuje zastávku Ředitelství Vítkovice, odkud jsou tyto linky vedeny po určitou délku znovu po stejném úseku, který již ale ke své délce a frekvenci linek na tomto úseku zanedbatelný není, jelikož společný úsek končí až v zastávce Mariánské náměstí (pro porovnání se jedná o mnohem delší úsek než je úsek A – B). Třetím případem, který je rovněž vyobrazen na schématu, je společný úsek linek 3 a 17. Specifický je pak od ostatních případů tím, že linky 3 a 17 obsluhují společný úsek od vrcholu G, přičemž až do konečné zastávky linky 3 jsou vedeny po totožné trase. Vrchol G pak reprezentuje zastávku Nová Ves, vodárna.

V dopravní síti může nastat situace, kdy lze spoje příjíždějící linky koordinovat se spoji více linek odjíždějících do stejných úseků (nemusí se jednat pouze o úsek, který je bezprostředně přiléhající přestupnímu uzlu). Má-li řešitel na výběr, je vhodné, aby při takové koordinaci přihlédl i k tzv. důležitosti linky. Důležitost linky neboli její význam se posuzuje např. podle poptávky po spojích dané linky, délky linky nebo ukazatele nepřímosti. Linky, které jsou v dopravní síti významné, budou v dalším textu nazývány jako linky páteřní. Naopak linky, které sice odjíždějí do stejného směru jako linky páteřní, nicméně kvůli své větší délce, nižší poptávce a zejména díky vyššímu ukazateli nepřímosti jsou méně využívány v celé své délce, budou označovány jako linky ostatní.

Řešení popisovaných úsekových koordinací je dále komplikováno tím, že v přestupním uzlu Dubina je vhodné zajistit koordinaci spojů tramvajových linek se spoji městských autobusových linek č. 26, 55 a 59.

Časová koordinace bude na vybrané části dopravní sítě prováděna během dnů pracovního volna (soboty, neděle, příp. svátky) v podmínkách platného jízdního řádu 2017/2018. Nerovnoměrné rozložení spojů se aktuálně vyskytuje na úseku Dubina – Josefa Kotase, dále pak Josefa Kotase – ÚMOB Jih a Josefa Kotase – Hrabůvka kostel.

V současném stavu během krátkého časového intervalu odjíždějí spoje linek 1 a 12 do totožného směru (směr centrum), následně pak během dalšího krátkého časového intervalu odjíždějí spoje linek 3 a 17 do druhého směru (směr Poruba). Příjezdy a odjezdy dle původního platného jízdního řádu v rámci intervalu 20 minut jsou uvedeny na Obrázku 3.



Obrázek 3: Aktuální stav příjezdů a odjezdů tramvajových linek (přestupní uzel Dubina)

Aby bylo možné zajistit rovnoměrnou nabídku spojů do jednotlivých částí města, jeví se jako ideální řešení koordinace nejprve linek mířících do prvního hlavního směru, tzn. linek směr centrum – 1 a 12, a poté řešit koordinaci linek jedoucích do druhého hlavního směru, tzn., linek 3 a 17 směr Poruba s linkami 1 a 12.

Důležitým faktorem ovlivňujícím preferenci jednotlivých linek, tzn., zda si přestupující cestující jedoucí do centra vybere mezi linkami 1 a 12, či přestupující cestující jedoucího do Poruby mezi linkami 3 a 17, je průměrná časová dostupnost cílových městských částí. Vzhledem k tomu, že spoje linek 1 a 17 jsou do jednotlivých částí města linkami páteřními, měla by přestupní vazba z autobusových linek 26, 55 a 59 v přestupním uzlu Dubina proběhnout právě na tramvajové linky 1 a 17. I z toho důvodu se tedy jeví jako vhodnější koordinace dvojice linek 1 a 17 (s možností rychlého přestupu z autobusových linek) a poté koordinace spojů linek 3 a 12 se spoji linek 1 a 17. Analogický problém nastává i v opačném směru, kdy by z páteřních tramvajových linek 1 a 17 měla být zajištěna přestupní vazba v uzlu Dubina na autobusové linky 26, 55 a 59. Tento způsob koordinace je zvolen také proto, že tramvajové linky 3 a 12 sice ze zastávky Josefa Kotase obsluhují každá jiný přílehlý úsek, ale na svých trasách budou obsluhovat ještě společný úsek (konkrétně se jedná o úsek Ředitelství Vítkovic – Mariánské náměstí).

Další komplikací z hlediska časové koordinace v přestupním uzlu Dubina je spojení této městské části s Výškovicemi. Tyto dvě městské části jsou aktuálně spojeny jak autobusovou linkou (linka č. 55), tak tramvajovou linkou (linka č. 15), přičemž tramvajové spojení nabízí během dnů pracovního volna dvakrát kratší interval, než je tomu u linky autobusové. I přesto ale nastává situace, kdy z přestupního uzlu Dubina odjíždějí do Výškovic spoje těchto linek současně, navíc doba jízdy tramvajovým spojem trvá téměř dvojnásobnou dobu než spojem autobusovým. Je také velmi nepravděpodobné, že se cestující přepraví do přestupního uzlu Dubina jednou z tramvajových linek a k přesunu do Výškovic využije opět tramvajovou dopravu (museli

by tak část trasy absolvovat znovu), a tak se jako ideální varianta jeví možnost přestupu na autobusovou linku 55, znovu by tak mělo dojít k přestupu z využívanější dvojice páteřních linek 1 a 17.

4 Teoretická východiska řešení

Optimalizační modely mohou být rozděleny podle celé řady hledisek. Nejčastěji se ke kategorizaci používají hlediska:

- a) vlivu času,
- b) charakteru vstupních veličin.

Z hlediska vlivu času členíme modely na statické, jež jsou vhodné pro konkrétní situaci a nezahrnují vliv času, a dynamické, které vliv času zahrnují. Z hlediska charakteru vstupních veličin se matematické modely dělí na deterministické a stochastické. Deterministické modely dělíme dále na lineární, u nichž jsou veškeré podmínky a účelová funkce vyjádřeny lineárními rovnicemi či nerovnicemi, a nelineární, ve kterých se vyskytuje alespoň jeden nelineární vztah, ať již v účelové funkci nebo v omezujících podmínkách.

Při řešení definovaných problémů se jako vhodné optimalizační modely jeví lineární deterministické modely, neboť lineární modely jsou primárně určeny pro řešení rozhodovacích úloh plánovacího charakteru s dlouhodobějším časovým horizontem, což je v případě časové koordinace jednoznačně splněno. Základní výhodou lineárních modelů je garance nalezení optimálního řešení i v rozsáhlých úlohách, je-li k dispozici dostatečný výpočetní výkon a dostatečná doba k řešení úlohy.

Oblast aplikované matematiky zabývající se problematikou tvorby a řešení lineárních deterministických modelů se nazývá lineární programování.

Základem řešení úlohy s využitím lineárního programování je vytvoření matematického modelu úlohy. Optimalizační model se v obecné rovině skládá ze dvou částí – soustavy omezujících podmínek a optimalizačního kritéria.

Soustava omezujících podmínek vymezuje množinu přípustných řešení úlohy. Omezující podmínky mohou být dvojího druhu (strukturální a obligatorní) a vymezují množinu všech přípustných řešení úlohy. Strukturální podmínky vymezují reálná omezení a v případě potřeby vytvářejí požadované logické vazby mezi proměnnými, obligatorní podmínky pak vymezují definiční obory použitých proměnných. Optimalizační kritérium reprezentuje veličinu, pomocí které lze posoudit kvalitu jednotlivých přípustných řešení a je nedílnou součástí vytvářeného modelu. Je-li navíc formulováno jako funkční vztah, hovoří se o účelové funkci.

V úlohách lineárního programování se rozlišují dva druhy dat. První typ dat tvoří data známá již před započítím řešení dané úlohy, která jsou během výpočtu neměnná – konstanty. Druhý typ dat tvoří hodnoty veličin, jejichž hodnoty lze v průběhu výpočtu měnit – proměnné. Hodnoty proměnných nejsou před zahájením řešení úlohy konkretizovány, každá proměnná je na začátku řešení vymezena pouze svým definičním oborem.

V lineárním programování se rozlišují tři základní typy definičních oborů – množina nezáporných čísel, množina celých nezáporných čísel a množina zahrnující pouze hodnoty 0 a 1 (tzv. bivalentní proměnné). Množina nezáporných a celých nezáporných čísel může být využita např. pro časové údaje. Bivalentní proměnné zpravidla vyjadřují skutečnost, že nějaké rozhodnutí nabylo kladného či záporného významu. Pokud nastalo kladné rozhodnutí, bývá modelováno hodnotou 1, v opačném případě hodnotou 0.

Při řešení úlohy lineárním modelem mohou nastat tři situace. Buď je v úloze nalezeno jedno, nebo více optimálních řešení (v úlohách tzv. spojitého lineárního programování může být optimálních řešení také nekonečně mnoho), nebo řešená úloha žádné optimální řešení nemá, jelikož nelze splnit všechna zadaná omezení současně, nebo optimální řešení nelze najít z důvodu neohraničení množiny přípustných řešení ve směru optimalizace.

5 Návrh matematického modelu

5.1. Optimalizace časové koordinace spojů v přestupních uzlech

Prvním cílem diplomové práce je vytvořit matematický model časové koordinace v přestupních uzlech. Za základ matematického modelu řešícího uzlovou koordinaci je možno využít již existující model pro časovou koordinaci, jehož autorem je prof. Jaroslav Janáček, a který je publikován např. v [4]. Důvodem pro využití již existujícího modelu pro časovou koordinaci v přestupním uzlu je soulad řešené úlohy v oblastech vstupních dat, rozhodovacích proměnných a optimalizované veličiny.

Původní model je vytvořen pro izolovaný uzel s možnostmi příjezdů spojů z více směrů a možností odjezdu spojů do jednoho směru. Pro potřeby předkládané práce bylo nutno původní model rozšířit.

V navrženém matematickém modelu se bude předpokládat, že přijíždějící spoje budou přijíždět z jednoho nebo více směrů a odjíždějící spoje budou odjíždět do více směrů.

Dále se předpokládá, že existuje alespoň jeden kladný interval časového posunu alespoň u jednoho spoje. Pokud by předpoklad existence alespoň jednoho kladného intervalu, v němž je se spojem (spoji) možno posunovat v čase, nebyl splněn, časová koordinace v přestupním uzlu by nebyla smysluplná, jelikož není možno dosáhnout jiného lepšího řešení, než je řešení původní. Stávající řešení by tedy bylo řešením optimálním.

5.1.1. Obecná formulace problému časové koordinace v přestupních uzlech

Je dána množina přijíždějících spojů I , množina odjíždějících spojů J a množina směrů $k \in K$, do kterých spoje odjíždějí. U každého spoje $i \in I$ je znám aktuální čas příjezdu a interval, v němž je možné s příjezdem spoje $i \in I$ pohybovat. U odjíždějících spojů $j \in J$ je znám aktuální čas odjezdu a analogicky jako u přijíždějících spojů jsou k dispozici informace o intervalech a posunech těchto spojů v čase. Pro každý přijíždějící spoj $i \in I$ je také definována předpokládaná intenzita cestujících f_{ik} , kteří přestupují ze spoje $i \in I$ do směru $k \in K$. Dále jsou k dispozici informace o době přestupu z místa stanoviště přijíždějícího spoje $i \in I$ ke stanovišti odjíždějícího spoje $j \in J$ do směru $k \in K$, tato přestupní doba bude dále označována symbolem $t_{prest\ i,j,k}$. Úkolem je rozhodnout o posunech jednotlivých spojů v čase tak, aby se minimalizovala celková časová ztráta přestupujících cestujících v daném přestupním uzlu.

Časové posuny každého příjíždějícího spoje $i \in I$ i každého odjíždějícího spoje $j \in J$ do směru $k \in K$ mohou nabývat v obecné poloze jak záporných, tak i nezáporných hodnot. Aby byla zachována pravidla lineárního programování, která připouštějí pouze nezáporné hodnoty, a současně mohlo být využito v časových posunech jak nezáporných, tak záporných hodnot vztažmo k aktuálním časům příjezdů a odjezdů spojů, je nutno před začátkem optimalizace všechny spoje posunout do některé z krajních poloh intervalů, v této práci budou spoje posunuty do nejdříve možných časových poloh.

Hodnota t_{pi} bude reprezentovat nejdříve možný čas příjezdu spoje $i \in I$ a hodnota t_{ojk} bude reprezentovat nejdříve možný odjezd spoje $j \in J$ do směru $k \in K$. Vzhledem k faktu, že optimalizační software, který bude pro optimalizaci využíván, neumí pracovat s časovými údaji, bude zvolen na časové ose vztažný bod a časové polohy všech spojů budou prostřednictvím zvolených časových jednotek k tomuto vztažnému bodu přepočítány. Vztažný bod by přitom neměl nastat později, než je nejdříve možný čas prvního příjíždějícího spoje $i \in I$ a zároveň by neměl nastat později, než je nejdříve možný čas prvního odjíždějícího spoje $j \in J$ do směru $k \in K$. Vztažným bodem bude tedy zajištěno, že k posunům bude využita celá délka intervalu, ve kterém lze s daným spojem posouvat, a současně budou dodržena pravidla lineárního programování.

Výše popsaná problematika bude demonstrována následujícím příkladem. Nechť je dán příjíždějící spoj $i \in I$ s aktuálním příjezdem v čase 12:00, s nímž lze pohybovat v intervalu $\langle -2; 2 \rangle$. To znamená, že po optimalizaci může spoj $i \in I$ přijet do přestupního uzlu nejdříve v 11:58, nejpozději však ve 12:02. Po přesunutí spoje do polohy nejdříve možného příjezdu (11:58) se interval při zachování daného intervalu posunu následně změní na $\langle 0; 4 \rangle$. V nově vzniklém intervalu bylo tedy dosaženo nezáporných hodnot, s nimiž již je lineární programování schopno pracovat. Vztažným bodem by tedy v tomto případě byla časová poloha 11:58.

S hodnotami nejdříve možných časů příjezdů a odjezdů je také nutné definovat hodnoty maximálních možných časových posunů jednotlivých spojů. Množinu konstant tedy rozšíříme o maximální hodnoty časových posunů, tzn., maximální dovolený posun s příjíždějícím spojem $i \in I$ bude označen symbolem a_i , maximální dovolený posun s odjíždějícím spojem $j \in J$ do směru $k \in K$ bude označen symbolem b_{jk} . Při pravidelném linkovém intervalu bývá pravidlem, že maximální dovolený posun by neměl přesáhnout hodnotu linkového intervalu. To znamená, že pokud je na dané lince dovoleno posouvat se spoji v rámci celé délky příslušného intervalu, který je například 20 minut, pak se posun daného spoje může realizovat v intervalu $\langle 0; 19 \rangle$ a hodnota maximálního dovoleného posunu příjíždějícího spoje a_i nebo hodnota maximálního dovoleného posunu odjíždějícího spoje b_{jk} je tedy 19.

Při sestavě modelu časové koordinace v přestupním uzlu je kromě skupiny konstant nutno použít také skupinu proměnných. V časové koordinaci se rozhoduje o posunech jednotlivých spojů vztahmo k jejich nejdříve možným časům příjezdů a odjezdů. Optimalizačním kritériem je celková časová ztráta přestupujících cestujících. Proměnná x_i bude v modelu reprezentovat časový posun příjíždějícího spoje $i \in I$, proměnná y_{jk} pak bude reprezentovat časový posun odjíždějícího spoje $j \in J$ do směru $k \in K$ (posuny se budou vztahovat k nejdříve možným časům příjezdů a odjezdů daných spojů).

Časová ztráta jednoho přestupujícího cestujícího ze spoje $i \in I$ do směru $k \in K$, která je mj. také optimalizačním kritériem matematického modelu časové koordinace v přestupním uzlu, je pak reprezentována proměnnou h_{ik} .

Zatímco jak proměnné modelující časové posuny, tak i proměnné modelující čekání cestujících budou nabývat nezáporných hodnot, následující proměnná modelující rozhodnutí o vzniku přestupní vazby z příjíždějícího spoje $i \in I$ na odjíždějící spoj $j \in J$ do směru $k \in K$ bude proměnnou bivalentní a bude tedy nabývat pouze hodnot 0 nebo 1. Tato proměnná bude označena v další části textu symbolem z_{ijk} . V této souvislosti je také nezbytné definovat, jaké významy budou mít jednotlivé hodnoty 0 a 1. V případě, že $z_{ijk} = 1$, přestupní vazba z příjíždějícího spoje $i \in I$ na odjíždějící spoj $j \in J$ do směru $k \in K$ vznikne. Pokud však $z_{ijk} = 0$, přestupní vazba z příjíždějícího spoje $i \in I$ na odjíždějící spoj $j \in J$ do směru $k \in K$ nevznikne.

5.1.2. Matematický model pro časovou koordinaci spojů v přestupním uzlu příjíždějících z jednoho nebo více směrů a odjíždějících do více směrů:

Rekapitulace symbolů použitých v matematickém modelu a jejich významu:

I ... množina příjíždějících spojů,

K ... množina směrů, do kterých spoje odjíždějí,

J_k ... množina odjíždějících spojů do směru $k \in K$,

x_i ... časový posun příjíždějícího spoje $i \in I$ [min.],

y_{jk} ... časový posun odjíždějícího spoje $j \in J_k$ do směru $k \in K$ [min.],

z_{ijk} ... přestupní vazba ze spoje $i \in I$ na spoj $j \in J_k$ do směru $k \in K$,

$h_{ik} \dots$ časová ztráta jednoho přestupujícího cestujícího ze spoje $i \in I$ do směru $k \in K$ [min.],

$a_i \dots$ maximální hodnota časového posunu příjíždějícího spoje $i \in I$,

$b_{jk} \dots$ maximální hodnota časového posunu odjíždějícího spoje $j \in J_k$ do směru $k \in K$,

$t_{pi} \dots$ nejdříve možný čas příjezdu spoje $i \in I$,

$t_{ojk} \dots$ nejdříve možný čas odjezdu spoje $j \in J_k$ do směru $k \in K$,

$t_{prest\ i,j,k} \dots$ přestupní doba ze spoje $i \in I$ na spoj $j \in J_k$ do směru $k \in K$,

$f_{ik} \dots$ průměrný počet cestujících přestupujících ze spoje $i \in I$ do směru $k \in K$.

Matematický model pro časovou koordinaci spojů v přestupním uzlu s více směry, do kterých odjíždějí návazné spoje, má tvar:

$$\min f(x, y, h, z) = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} f_{ik} \cdot h_{ik} \quad (1.1)$$

za podmínek:

$$t_{ojk} + y_{jk} - (t_{pi} + x_i + t_{prest\ i,j,k}) \geq M \cdot (z_{ijk} - 1) \quad pro\ i \in I, j \in J_k, k \in K \quad (1.2)$$

$$t_{ojk} + y_{jk} - (t_{pi} + x_i + t_{prest\ i,j,k}) \leq h_{ik} + M \cdot (1 - z_{ijk}) \quad pro\ i \in I, j \in J_k, k \in K \quad (1.3)$$

$$\sum_{j \in J} z_{ijk} = 1 \quad pro\ i \in I, k \in K \quad (1.4)$$

$$x_i \leq a_i \quad pro\ i \in I \quad (1.5)$$

$$y_{jk} \leq b_{jk} \quad pro\ j \in J_k, k \in K \quad (1.6)$$

$$x_i \geq 0 \quad pro\ i \in I \quad (1.7)$$

$$y_{jk} \geq 0 \quad pro\ j \in J_k, k \in K \quad (1.8)$$

$$h_{ik} \geq 0 \quad pro\ i \in I, k \in K \quad (1.9)$$

$$z_{ijk} \in \{0; 1\} \quad pro\ i \in I, j \in J_k, k \in K \quad (1.10)$$

Výraz (1.1) reprezentuje účelovou funkci – celkovou časovou ztrátu všech přestupujících cestujících ze všech příjíždějících spojů do všech směrů. Skupina podmínek (1.2) zajišťuje, že když cestující přestupující ze spoje $i \in I$ do směru $k \in K$ spoj $j \in J_k$ nestihne, tak přestupní vazba nevzniká. Skupina podmínek (1.3) zajišťuje, že pokud přestupní vazba ze spoje $i \in I$ na spoj $j \in J_k$ do směru $k \in K$ vzniká, kvantifikuje se časová ztráta přestupujícího cestujícího ze spoje $i \in I$ na nejbližší návazný spoj do tohoto směru. Skupina podmínek (1.4) zajišťuje, že z každého příjíždějícího spoje $i \in I$ bude možné přestoupit na spoj $j \in J$ do směru $k \in K$. Skupina podmínek (1.5) zajišťuje, že časové posuny příjíždějících spojů nepřekročí maximální hodnoty časových posunů u příjíždějících spojů. Skupina podmínek (1.6) zajišťuje, že časové posuny odjíždějících spojů nepřekročí maximální hodnoty časových posunů u odjíždějících spojů. Skupina podmínek (1.7) – (1.10) vymezuje definiční obory proměnných vystupujících v modelu.

Zatímco v původním modelu pro časovou koordinaci spojů v přestupním uzlu se uvažuje s příjíždějícími i s odjíždějícími spoji z/do několika směrů, v podmínkách taktové dopravy Dopravního podniku Ostrava, konkrétně v přestupním uzlu Dubina, lze přistoupit za účelem snížení počtu bivalentních proměnných k redukci původního modelu.

První zjednodušení modelu nastane u příjíždějících spojů, jejichž příjezdy jsou v taktu. Postup zjednodušení bude demonstrován na následujícím příkladu, v němž čísla linek neodpovídají číslům skutečných koordinovaných linek.

Nechť je dán příjíždějící spoj autobusové linky č. 1 s aktuálním příjezdem do přestupního uzlu v čase 12:00 a pravidelným intervalem 80 minut (další spoj linky č. 1 tedy přijede do přestupního uzlu v čase 13:20). Ze stejného směru přijede do přestupního uzlu spoj autobusové linky č. 2 s aktuálním příjezdem v čase 12:40, linka je provozována rovněž s pravidelným intervalem 80 minut (další spoj linky č. 2 tedy přijede do přestupního uzlu v čase 14:00). Autobusy tedy příjíždějí z jednoho směru do přestupního uzlu v intervalu 40 minut (ve 12:00 – spoj linky č. 1, ve 12:40 – spoj linky č. 2, ve 13:20 – spoj linky č. 1, ve 14:00 – spoj linky č. 2, atp.), tzn., že požadavek na vznik přestupní vazby tedy v reálném provozu vzniká právě každých 40 minut.

V přestupním uzlu vznikají přestupní vazby ze spojů uvedených dvou autobusových linek na spoje dvou páteřních tramvajových linek č. 3 a č. 4, spoje obou linek mají stanoven pravidelný interval 20 minut a společné odjezdy v časech 12:04, 12:24, 12:44 atd.

Koordinační období u tohoto modelového příkladu by tak mohlo trvat dvě hodiny. S ohledem na taktovou dopravu, která musí být dodržena i po časové koordinaci, lze ale model realizovat v redukované formě v rámci koordinačního období trvajících pouze jednu

hodiny. Toho lze docílit tím, že příjezd spoje autobusové linky č. 1 v čase 13:20 přeneseme na časovou osu do fiktivní časové polohy v čase 12:20. Hodina příjezdu v tomto případě není rozhodující, neboť v případě, že by se časová koordinace uskutečnila v rámci dvou hodin a k příjezdu autobusové linky č. 1 v čase 13:20 by se v rámci možných časových posunů koordinovaly odjezdy spojů tramvajových linek č. 3 a č. 4 například do časových poloh 13:22, musely by se v rámci zachování taktové dopravy posunout o stejnou dobu i všechny následující i předchozí odjezdy spojů tramvajových linek (13:02, 13:42, 14:02 atp.).

V podmínkách taktové dopravy je možno model dále redukovat v tom smyslu, že na každé lince bude uvažováno pouze s jedním příjíždějícím spojem a dvěma odjíždějícími spoji. Druhý odjíždějící spoj je zaveden z toho důvodu, aby bylo možno vytvořit přestupní vazbu z příjíždějícího spoje, jehož čas příjezdu bude naplánován po času odjezdu prvního spoje téže linky.

Co se týče intenzit přestupujících cestujících, je možno v podmínkách taktové dopravy přijmout další zjednodušení. To spočívá v tom, že pro každý přestupující směr stanovíme jednu intenzitu, která vznikne jako součet intenzit přestupujících cestujících ze všech příjíždějících spojů. V taktové dopravě je možno tento způsob využít, neboť nedojde ke zkreslení hodnoty účelové funkce. Další možností je použít místo součtu intenzit jejich aritmetický průměr, tato možnost sice neovlivní výsledné optimální řešení z pohledu časových poloh spojů, ale dojde ke zkreslení hodnoty účelové funkce.

Vzhledem k nutnosti zachování taktové dopravy jak u spojů autobusových, tak u spojů tramvajových linek lze matematický model ještě dále redukovat tak, že původní matematický model, který operuje s příjíždějícími a odjíždějícími spoji, upravíme do tvaru, jenž bude operovat pouze se směry, ze kterých spoje příjíždějí, a směry, do kterých spoje odjíždějí. Tímto způsobem bude model redukován o množiny J_k , jejichž odstraněním se sníží počet bivalentních proměnných modelujících rozhodnutí, zda přestupní vazby vzniknou, či nikoliv.

5.2. Obecná formulace úlohy o časové koordinaci v přestupních uzlech s taktovým vedením spojů koordinovaných linek

V následujícím matematickém modelu je uvažováno s taktovým provozem na všech linkách, jejichž spoje jsou koordinovány, ve smyslu zjednodušení popsanych v podkapitole 5.1.2 jsou redukovány počty spojů a kumulovány intenzity přestupujících cestujících.

Je dána množina směrů I , ze kterých spoje příjíždějí, a množina směrů K , do kterých spoje navazujících linek odjíždějí. Z každého směru $i \in I$ je znám aktuální čas

příjezdu jednoho spoje a interval, v němž je možné s časem příjezd spoje ze směru $i \in I$ pohybovat. U každého ze dvou odjíždějících spojů do každého směru $k \in K$ je rovněž znám aktuální čas odjezdu a stejně jako u příjíždějících spojů jsou k dispozici informace o intervalech a maximálních možných posunech těchto spojů v čase.

Pro každý příjíždějící spoj ze směru $i \in I$ je také definována předpokládaná intenzita cestujících f_{ik} , kteří přestupují ze spoje ze směru $i \in I$ na spoj do směru $k \in K$. Dále jsou k dispozici informace o době přestupu ze stanoviště příjíždějícího spoje ze směru $i \in I$ na stanoviště odjíždějícího spoje do směru $k \in K$, tato přestupní doba bude dále označována symbolem $t_{prest\ i,k}$. Úkolem je rozhodnout o posunech jednotlivých spojů z různých směrů v čase tak, aby se minimalizovala celková časová ztráta přestupujících cestujících v daném přestupním uzlu. V platnosti zůstává zásada přesunů do všech spojů do nejdříve možných poloh, nutnost transformace časových údajů a volby vztažného bodu.

Z každého směru je v rámci koordinačního modelu uvažován jeden příjíždějící spoj a do každého směru jsou v rámci koordinačního modelu uvažovány dva odjíždějící spoje.

Z uvedeného modelu bude vycházeno při tvorbě výsledného modelu časové koordinace spojů v přestupním uzlu Dubina.

Symbody použité v matematickém modelu a jejich významy:

I ... množina směrů, ze kterých spoje příjíždějí,

K ... množina směrů, do kterých spoje odjíždějí,

V ... množina odjíždějících spojů,

a_i ... maximální hodnota časového posunu příjíždějícího spoje ze směru $i \in I$,

b_k ... maximální hodnota časového posunu odjíždějícího spoje do směru $k \in K$,

t_{pi} ... nejdříve možný čas příjezdu spoje ze směru $i \in I$,

t_{okv} ... nejdříve možný čas odjezdu spoje $v \in V$ do směru $k \in K$,

$t_{prest\ i,k}$... přestupní doba mezi stanovištěm příjíždějícího spoje ze směru $i \in I$ na odjíždějící spoj do směru $k \in K$,

f_{ik} ... celkový průměrný počet cestujících přestupujících ze spoje ze směru $i \in I$ do směru $k \in K$,

x_i ... proměnná modelující časový posun přijíždějícího spoje ze směru $i \in I$ [min],

y_k ... proměnná modelující časové posuny odjíždějících spojů do směru $k \in K$ [min],

z_{ikv} ... proměnná modelující přestupní vazba ze spoje ze směru $i \in I$ na spoj $v \in V$ do směru $k \in K$,

h_{ik} ... proměnná modelující časovou ztrátu jednoho přestupujícího cestujícího ze spoje ze směru $i \in I$ na první možný navazující spoj do směru $k \in K$ [min.],

Matematický model pro časovou koordinaci spojů v přestupním uzlu má tvar:

$$\min f(x, y, h, z) = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} f_{ik} \cdot h_{ik} \quad (2.1)$$

za podmínek:

$$t_{okv} + y_k - (t_{pi} + x_i + t_{prest\ i,k}) \geq M \cdot (z_{ikv} - 1) \quad pro\ i \in I, k \in K, v \in V \quad (2.2)$$

$$t_{okv} + y_k - (t_{pi} + x_i + t_{prest\ i,k}) \leq h_{ik} + M \cdot (1 - z_{ikv}) \quad pro\ i \in I, k \in K, v \in V \quad (2.3)$$

$$\sum_{v \in V} z_{ikv} = 1 \quad pro\ i \in I, k \in K \quad (2.4)$$

$$x_i \leq a_i \quad pro\ i \in I \quad (2.5)$$

$$y_k \leq b_k \quad pro\ k \in K \quad (2.6)$$

$$x_i \geq 0 \quad pro\ i \in I \quad (2.7)$$

$$y_k \geq 0 \quad pro\ k \in K \quad (2.8)$$

$$h_{ik} \geq 0 \quad pro\ i \in I, k \in K \quad (2.9)$$

$$z_{ikv} \in \{0; 1\} \quad pro\ i \in I, k \in K, v \in V \quad (2.10)$$

Výraz (2.1) reprezentuje účelovou funkci – celkovou časovou ztrátu všech přestupujících cestujících ze spojů ze všech směrů do všech směrů. Skupina podmínek (2.2) zajišťuje, že když spoj do směru $k \in K$ nevyčká podle jízdního řádu příjezdu spoje ze směru $i \in I$, tak přestupní vazba nevznikne. Skupina podmínek (2.3) zajišťuje, že pokud přestupní vazba ze spoje ze směru $i \in I$ na spoj do směru $k \in K$ vzniká, bude se kvantifikovat časová ztráta přestupujícího cestujícího ze spoje ze směru $i \in I$. Skupina podmínek (2.4) zajišťuje, že z každého přijíždějícího spoje ze směru $i \in I$ bude možno

přestoupit právě na jeden spoj do směru $k \in K$. Skupina podmínek (2.5) zajišťuje, že časové posuny spojů z příjíždějících směrů nepřekročí maximální hodnoty časových posunů pro tyto spoje. Skupina podmínek (2.6) zajišťuje, že časové posuny spojů odjíždějících do jednotlivých směrů nepřekročí maximální hodnoty časových posunů do těchto směrů. Skupiny podmínek (2.7) – (2.10) vymezují definiční obory proměnných vystupujících v modelu.

5.3. Problémy na obratištích související s časovou koordinací spojů

V souvislosti s časovou koordinací v přestupních uzlech, které jsou obsluhovány kromě autobusové také tramvajovou nebo trolejbusovou dopravou, je potřeba brát v úvahu také nevýhody těchto druhů doprav, které mohou mít při optimalizaci časové koordinace v přestupních uzlech klíčový dopad. Jedním z těchto problémů je závislost trolejbusové a tramvajové dopravy na trakci, přičemž u trolejbusů je možná alespoň částečná manipulace související s předjížděním vozidel. Naproti tomu je tramvajová doprava od trolejbusové závislá nejen na trakci, ale také na kolejové infrastruktuře, tedy případné předjíždění vozidel na téže koleji je vyloučeno. Musí být tedy zachováno pořadí odjezdů jednotlivých vozidel nebo jejich souprav ve stejném pořadí, v jakém tato vozidla nebo jejich soupravy byly přistaveny.

Časovou koordinaci v přestupních uzlech s tramvajovou dopravou tedy ovlivňuje také počet kolejí na obratišti, kterými přestupní uzel disponuje. Zde mohou nastat dva případy. Prvním z nich je situace, kdy obratiště obsluhuje méně, nebo právě tolik linek, kolik je disponibilní počet manipulačních kolejí. V tomto případě je není nutno problematiku předjíždění řešit, jelikož je vozidlům každé linky možno přiřadit právě jednu manipulační kolej. Opačná situace ale nastává v situaci, kdy přestupní uzel disponuje menším počtem manipulačních kolejí, než je počet tramvajových linek, které daný přestupní uzel obsluhují. Po provedení výpočetních experimentů modelu časové koordinace je tedy možné, že optimalizační software nabídne řešení, které je z hlediska zachování pořadí příjíždějících a odjíždějících vozidel nerealizovatelné. Tento problém bude demonstrován následujícím opět modelovým příkladem.

Nechť je přestupní uzel vybaven tramvajovým obratištěm se dvěma kolejemi a je obsluhován třemi tramvajovými linkami. Spoj linky č. 1 přijíždí po optimalizaci do přestupního uzlu v čase 12:00, spoj linky č. 2 v čase 12:01 a spoj linky č. 3 v čase 12:02. Odjezdy jednotlivých linek jsou po optimalizaci naplánovány takto: spoj linky č. 1 odjíždí v čase 12:10, spoj linky č. 2 v čase 12:09 a spoj linky č. 3 v čase 12:08. V této situaci jsou výsledky optimalizace v praxi nerealizovatelné, jelikož při dvou obsluhovaných kolejích bude nutné spojit linky č. 2 vzhledem k pozdějšímu příjezdu a dřívejšímu odjezdu

na / z obratiště vůči spoji linky č. 1 přidělit jinou kolej, než byla přidělena spoji linky č. 1. V čase 12:01 již tedy budou obsazeny obě koleje, a tak následný příjezd spoje linky č. 3 v čase 12:02 negativně ovlivňuje plánovaný odjezd spoje téže linky zajišťovaný týmž vozidlem v čase 12:08. Vzhledem k obsazenosti obou kolejí by tedy byl spoj linky č. 3 nucen vyčkat minimálně do té doby, než vozidla obsluhující spoje některé z linek č. 1 nebo č. 2 výjezd z manipulační koleje na obratišti uvolní.

Odstranění tohoto problému je dalším cílem diplomové práce. Jedná se tedy o vytvoření modelu, který řeší problém přidělování kolejí na obratištích vozidlům obsluhujícím spoje jednotlivých linek a plánování časů jejich příjezdů a odjezdů tak, aby v rámci časové koordinace v daném přestupním uzlu bylo zachováno pořadí příjezdů a odjezdů u linek, jimž bude přidělena stejná manipulační kolej.

5.3.1. Obecný model úlohy o přidělování tramvajových linek manipulačním kolejím na obratištích

Je dána množina tramvajových linek L , která využívá příslušné obratiště s množinou manipulačních kolejí R . Předpokládejme, že každé lince $l \in L$ bude přidělena právě jedna kolej $r \in R$ a že každé vozidlo obsluhující tramvajovou linku $l \in L$ setrvá na obratišti alespoň minimální definovanou dobu potřebnou pro likvidaci případného zpoždění způsobených provozními důvody nebo pro čerpání bezpečnostních přestávek řidičů. Aby bylo účelné problém o obratištích a přidělování jednotlivých kolejí daným linkám řešit, musí platit nerovnost $|L| > |R|$, kde $|L|$ je počet linek a $|R|$ je počet disponibilních manipulačních kolejí.

Za účelem modelování rozhodnutí o přiřazení manipulační koleje $r \in R$ tramvajové lince $l \in L$ bude do úlohy zavedena proměnná w_{lr} s definičním oborem obsahujícím hodnoty 0 a 1. Když po ukončení optimalizačního výpočtu bude $w_{lr} = 1$, potom linka $l \in L$ bude přidělena koleji $r \in R$. Pokud po ukončení optimalizačního výpočtu bude $w_{lr} = 0$, bude to znamenat opak. Při sestavě modelu v přestupním uzlu na obratišti je kromě skupiny bivalentní proměnné nutno použít také další skupinu proměnných. Proměnná $x_{t_{lr}}$ v modelu bude reprezentovat časový posun příjíždějící linky $l \in L$ na kolej $r \in R$, proměnná $y_{t_{lr}}$ pak reprezentuje časový posun odjíždějící linky $l \in L$ z koleje $r \in R$. Definičním oborem obou proměnných bude množina nezáporných čísel.

Při splnění podmínky, kdy je počet linek větší, než počet disponibilních manipulačních kolejí s jistotou nastane situace, kdy alespoň jedné koleji bude přiřazena více než jedna linka. V tomto případě je pak nutné koleji, které je přiděleno více linek, určit pořadí linek tak, aby bylo zachováno pravidlo postupného příjezdu i odjezdu. To znamená, že např. pokud jsou manipulační koleji 1 přiděleny tramvajové linky č. 1 a č. 2 a spoj linky č. 1 přijede na tuto kolej před spojem linky č. 2, pak spoj linky č. 2 také

odjede po odjezdu spoje linky č. 1. Toto pořadí je definováno novou proměnnou st_{ijr} , která modeluje, že vozidlo obsluhující spoje linky $i \in L$ přijede na kolej $r \in R$ před vozidlem obsluhujícím spoje linky $j \in L$. Pro správné fungování modelu jsou pak do modelu ještě zabudovány dvě skupiny bivalentních proměnných rt_{ijr} a tt_{ijr} , které upřesňují logické vazby mezi proměnnými st_{ijr} a wt_{ir} .

Úkolem je rozhodnout o přiřazení jednotlivých tramvajových linek daným kolejím tak, aby se minimalizovala celková délka pobytu vozidel obsluhujících linky, jejichž jízda končí na obratišti, což je také optimalizačním kritériem celého modelu. Uvedené kritérium je však pouze zástupné, aby umožnilo testovat funkčnost navrženého modelu.

Rekapitulace symbolů použitých v matematickém modelu a jejich významu:

L ... množina linek, jejichž vozidla využívají obratiště,

R ... množina manipulačních kolejí na obratišti,

xt_{ir} ... časový posun příjezdu spoje linky $i \in L$ na kolej $r \in R$ vztažmo k jeho nejdříve možnému času příjezdu,

yt_{ir} ... časový posun odjezdu spoje linky $i \in L$ z koleje $r \in R$ vztažmo k jeho nejdříve možnému času odjezdu,

st_{ijr} ... rozhodnutí, zda vozidlo obsluhující spoj linky $i \in L$ přijede na kolej $r \in R$ před vozidlem obsluhujícím spoj linky $j \in L$ ($s_{ijr} = 1$) nebo ne

wt_{ir} ... rozhodnutí o přidělení linky $i \in L$ na kolej $r \in R$,

rt_{ijr} ... proměnná zajišťující vzájemné vazby mezi proměnnými st_{ijr} a wt_{ir} ,

tt_{ijr} ... proměnná zajišťující vzájemné vazby mezi proměnnými st_{ijr} a wt_{ir} ,

p ... minimální doba pobytu tramvajové linky na obratišti,

q ... hodnota maximálního dovoleného posunu příjezdu tramvajové linky.

Matematický model pro optimalizaci řazení jednotlivých linek na příslušné koleje má tvar (účelová funkce byla volena modelově, aby bylo možno ověřit funkčnost modelu):

$$\min f(x, y, w, s) = \sum_{i \in L} \sum_{r \in R} (yt_{ir} - xt_{ir}) \quad (3.1)$$

$$\sum_{r \in R} wt_{ir} = 1 \quad \text{pro } i \in L \quad (3.2)$$

$$\sum_{r \in R} (st_{ijr} + st_{jir}) \leq 1 \quad \text{pro } i \in L; j \in L; i \neq j \quad (3.3)$$

$$yt_{ir} - xt_{ir} \geq p \cdot wt_{ir} \quad \text{pro } i \in L; r \in R \quad (3.4)$$

$$xt_{ir} \leq q \cdot wt_{ir} \quad \text{pro } i \in L; r \in R \quad (3.5)$$

$$xt_{ir} \leq a_{ir} \quad \text{pro } i \in L; r \in R \quad (3.6)$$

$$yt_{ir} \leq b_{ir} \quad \text{pro } i \in L; r \in R \quad (3.7)$$

$$xt_{ir} \geq 0 \quad \text{pro } i \in L; r \in R \quad (3.8)$$

$$yt_{ir} \geq 0 \quad \text{pro } i \in L; r \in R \quad (3.9)$$

$$wt_{ir} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in L; r \in R \quad (3.10)$$

$$st_{ijr} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in L; j \in L; r \in R \quad (3.11)$$

Výraz (3.1) reprezentuje účelovou funkci – celkovou dobu pobytu vozidel obsluhujících spoje jednotlivých linek na obratišti. Skupina podmínek (3.2) reprezentuje, že každé lince $i \in L$ bude přiřazena právě jedna kolej $r \in R$. Skupina podmínek (3.3) zajišťuje, že pokud budou linky $i \in L$ a $j \in L$ přiřazeny na kolej $r \in R$, pak bude těmto linkám přiděleno maximálně jedno pořadí příjezdů a odjezdů na / z dané koleje. Skupina podmínek (3.4) zajišťuje, že pokud bude linka $i \in L$ přidělena koleji $r \in R$, pak linka $i \in L$ bude mít vyčleněnu na této koleji dobu alespoň p minut. Tuto hodnotu je možné měnit změnou konstanty v pravé části nerovnice. Skupina podmínek (3.5) zajišťuje, že v případě přidělení koleje $r \in R$ lince $i \in L$ se časový posun realizuje pouze v rámci linkového intervalu, který nabývá hodnoty q . Tuto hodnotu je opět možno měnit změnou hodnoty konstanty v pravé části nerovnice. Další dvojice skupin podmínek pak reprezentuje skutečnost, kdy jsou příjezdy (3.6) a odjezdy (3.7) jednotlivých linek uskutečněny v přípustných mezích. Skupiny podmínek (3.8) – (3.11) vymezují definiční obory proměnných vystupujících v modelu.

V reálné dopravní praxi může být ale například požadováno, aby kolejím bylo přiřazeno maximálně c linek. Toho lze dosáhnout přidáním omezující podmínky ve tvaru:

$$\sum_{i \in L} wt_{ir} \leq c \quad \text{pro } r \in R \quad (3.12)$$

a v případě, že dané koleji $r \in R$ má být přiděleno právě c linek, pak bude předešlá podmínka upravena do tvaru:

$$\sum_{i \in L} wt_{ir} = c \quad \text{pro } r \in R \quad (3.13)$$

V tramvajové dopravě také běžně dochází k situaci, kdy jsou spoje například z provozních důvodů opožděny a kdy by byly vzhledem k nastalým opožděním vzniklé vazby vypočítané optimalizačním software při přidělování kolejí jednotlivým linkám narušeny. Tento problém bude demonstrován následujícím příkladem. Optimalizační software přidělí vozidlům tramvajových linek č. 1 a č. 2 kolej č. 1 (ostatní koleje jsou již obsazeny) s tím, že spoj linky č. 1 přijede na obratiště v čase 12:03, a příjezd spoje linky č. 2 je naplánován v čase 12:04. Odjezd spoje linky č. 1 obsluhovaný stejným vozidlem je naplánován v 12:10, odjezd spoje linky č. 2 obsluhovaný stejným vozidlem pak ve 12:15. Vzhledem k provozním důvodům je ovšem spoj linky č. 1 opožděn na svém příjezdu o dvě minuty, přijede tedy nejdříve ve 12:05, a spoj linky č. 2 přijel v čase svého pravidelného příjezdu, tedy ve 12:04. V této situaci je odjezd vozidla linky č. 1 blokován soupravou linky č. 2. Z tohoto důvodu je tedy možné do modelu přidat další omezující podmínky, které linkám, jež jsou přiděleny na stejnou kolej, přidělí časové posuny v různých polohách (bude vyloučena situace, ve které by na stejnou kolej přijela vozidla dvou linek ve stejnou minutu). K tomu lze použít podmínky typu následujícího typu, které budou mít tvar:

$$xt_{ir} + e \leq xt_{jr} + M \cdot (1 - st_{ijr}) \quad \text{pro } i \in L; j \in L; r \in R; i \neq j \quad (3.14)$$

$$yt_{ir} + e \leq yt_{jr} + M \cdot (1 - st_{ijr}) \quad \text{pro } i \in L; j \in L; r \in R; i \neq j \quad (3.15)$$

V této fázi ale ještě model není v korektním tvaru, neboť není definována přímá vazba mezi přidělením jednotlivých linek kolejím a současně tím, aby bylo zachováno správné pořadí mezi příjezdy a odjezdy spojů. Toho lze docílit doplněním dalších skupin podmínek, v nichž již figurují také pomocné proměnné rt_{ijr} a tt_{ijr} .

$$wt_{ir} + wt_{jr} = rt_{ijr} + tt_{ijr} \quad \text{pro } i \in L; j \in L; r \in R \quad (3.16)$$

$$st_{ijr} + st_{jir} = rt_{ijr} \quad \text{pro } i \in L; j \in L; r \in R \quad (3.17)$$

$$rt_{ijr} \leq tt_{ijr} \quad \text{pro } i \in L; j \in L; r \in R \quad (3.18)$$

a následně i obligatorní podmínky

$$rt_{ijr} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in L; j \in L; r \in R \quad (3.19)$$

$$tt_{ijr} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in L; j \in L; r \in R \quad (3.20)$$

Funkce vazeb mezi skupinami podmínek (3.16), (3.17) a (3.18) bude demonstrována na následujících příkladech. Necht' např. $i = 1; j = 2$ a $r = 1$.

První případ nastane, kdy vozidla linek č. 1 a č. 2 nebudou přiděleny koleji č. 1. V tomto případě nabydou proměnné wt_{11} a wt_{21} hodnot 0, přičemž, aby byla splněna podmínka (3.16), musí rovněž platit $rt_{121} = 0$ a $tt_{121} = 0$. Jelikož koleji č. 1 nebyla přidělena žádná z obou linek, pak nemůže být přiděleno ani žádné pořadí těchto linek na koleji č. 1. Pomocná proměnná $rt_{121} = 0$, což znamená, že v další podmínce (3.17) budou hodnoty st_{121} a st_{211} rovněž rovny hodnotě 0. Tím je zajištěno, že na koleji č. 1 nebude přiděleno žádné pořadí vozidlům linek č. 1 a č. 2.

Druhá situace nastává v případě, kdy právě jedna z dvojice linek je přidělena na kolej č. 1. Nechť je na kolej č. 1 přidělena linka č. 1, zatímco linka č. 2 je přidělena na jinou neobsazenou kolej. V tomto případě nabude hodnota $wt_{11} = 1$ a $wt_{21} = 0$, a tudíž musí pravá strana rovnice (3.16) nabýt v součtu hodnoty 1. Toho lze dosáhnout dosazením hodnoty 1 za jednu z proměnných rt_{121} nebo tt_{121} . Vzhledem k tomu, že ale na kolej č. 1 stále nejsou přiděleny obě linky, musí v rovnici (3.17) nabýt levá strana hodnoty 0, a tudíž i $rt_{121} = 0$. V této fázi musí pro dodržení rovnosti u omezující podmínky (3.16) platit $tt_{121} = 1$. Opačná situace ($rt_{121} = 1$ a $tt_{121} = 0$) není možná, jelikož je do modelu za účelem správného fungování přidána ještě jedna vazební podmínka (3.18) mezi bivalentními proměnnými rt_{121} a tt_{121} , která by při současném definování této vazební podmínky zavazovala k tomu, aby také proměnná $tt_{121} = 1$, čímž by narušila rovnost podmínek výše uvedených.

Poslední možnou variantou je přidělení obou linek na kolej č. 1 ($wt_{11} = 1$ a $wt_{21} = 1$). V této fázi je model nucen přidělit pro zachování rovnosti u skupiny omezujících podmínek (3.16) pomocným proměnným rt_{121} a tt_{121} logickou hodnotu 1. V této fázi je splněna také vazební podmínka (3.18) mezi pomocnými bivalentními proměnnými a současně bude model nucen pro splnění rovnice (3.17) přidělit linkám na stejné koleji pořadí příjezdů a odjezdů těchto linek.

5.3.2. Obousměrný matematický model pro časovou koordinaci spojů v přestupním uzlu příjíždějících z jednoho nebo více směrů a odjíždějících do více směrů včetně přiřazení kolejí tramvajovým linkám na obratišti

V kontextu možných zjednodušení modelů pro uzlovou koordinaci popsaných v podkapitole 5.2 bude přijato zjednodušení, že každá linka, z jejíchž spojů bude přestupováno, bude zahrnovat pouze jeden spoj a každá linka, na jejíž spoje bude přestupováno, bude zahrnovat dva spoje.

Symbolsy použité v matematickém modelu a jejich významy:

I ... množina autobusových linek,

J ... množina tramvajových linek,

V ... množina odjíždějících spojů (pro každou linku jsou definovány dva odjíždějící spoje),

R ... množina manipulačních kolejí na tramvajovém obratišti,

$todt_{jv}$... nejdříve možný čas odjezdu spoje $v \in V$ tramvajové linky $j \in J$,

$toda_{iv}$... nejdříve možný čas odjezdu spoje $v \in V$ autobusové linky $i \in I$,

tpa_i ... nejdříve možný čas příjezdu spoje autobusové linky $i \in I$,

tpt_j ... nejdříve možný čas příjezdu spoje tramvajové linky $j \in J$,

yt_{jr} ... časový posun odjezdu spoje tramvajové linky $j \in J$ z koleje $r \in R$,

ya_i ... časový posun odjezdu spoje autobusové linky $i \in I$,

xt_{jr} ... časový posun příjezdu spoje tramvajové linky $j \in J$ na kolej $r \in R$,

xa_i ... časový posun příjezdu spoje autobusové linky $i \in I$,

ha_{ij} ... časová ztráta cestujícího přestupujícího ze spoje autobusové linky $i \in I$ na spoj tramvajové linky $j \in J$,

ht_{ji} ... časová ztráta cestujícího přestupujícího ze spoje tramvajové linky $j \in J$ na spoj autobusové linky $i \in I$,

t_{prest} ... přestupní doba (je uvažována konstantní pro všechny přestupní směry),

zat_{ijv} ... proměnná reprezentující vznik přestupní vazby ze spoje autobusové linky $i \in I$ na spoj $v \in V$ tramvajové linky $j \in J$,

zta_{jiv} ... proměnná reprezentující vznik přestupní vazby ze spoje tramvajové linky $j \in J$ na spoj $v \in V$ autobusové linky $i \in I$,

aa_i ... nejvyšší dovolený časový posun příjezdu spoje autobusové linky $i \in I$,

ba_i ... nejvyšší dovolený časový posun odjezdu spoje autobusové linky $i \in I$,

at_j ... nejvyšší dovolený časový posun příjezdu spoje tramvajové linky $j \in J$,

bt_j ... nejvyšší dovolený časový posun odjezdu spoje tramvajové linky $j \in J$,

wt_{jr} ... proměnná modelující rozhodnutí o přidělení tramvajové linky $j \in J$ manipulační koleji $r \in R$,

st_{ijr} ... proměnná modelující rozhodnutí o tom, že vozidlo tramvajové linky $i \in J$ přijede na kolej $r \in R$ před příjezdem vozidla tramvajové linky $j \in J$,

rt_{ijr} ... proměnná zajišťující vzájemné vazby mezi proměnnými st_{ijr} a wt_{ir} ,

tt_{ijr} ... proměnná zajišťující vzájemné vazby mezi proměnnými st_{ijr} a wt_{ir} ,

p ... minimální doba pobytu tramvajové linky na tramvajovém obratišti,

q ... hodnota maximálního dovoleného posunu příjezdů spojů tramvajových linek (u všech tramvajových linek jsou hodnoty stejné).

Matematický model pro optimalizaci řazení jednotlivých linek na příslušné koleje včetně obousměrné koordinace spojů v přestupním uzlu má tvar:

$$\min f(x, y, h, z) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_{a_{ij}} \cdot ha_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_{t_{ji}} \cdot ht_{ji} \quad (4.1)$$

za podmínek

$$\begin{aligned} & todt_{jv} + yt_{jr} - (tpa_i + xa_i + t_{prest}) \\ & \geq M \cdot (zat_{ijv} - 1) \end{aligned} \quad \text{pro } i \in I, j \in J, v \in V, r \in R \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} & toda_{iv} + ya_i - (tpt_j + xt_{jr} + t_{prest}) \\ & \geq M \cdot (zta_{jiv} - 1) \end{aligned} \quad \text{pro } i \in I, j \in J, v \in V, r \in R \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} & todt_{jv} + yt_{jr} - (tpa_i + xa_i + t_{prest}) \\ & \leq ha_{ij} + M \cdot (1 - zat_{ijv}) \end{aligned} \quad \text{pro } i \in I, j \in J, v \in V, r \in R \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} & toda_{iv} + ya_i - (tpt_j + xt_{jr} + t_{prest}) \\ & \leq ht_{ji} + M \cdot (1 - zta_{jiv}) \end{aligned} \quad \text{pro } i \in I, j \in J, v \in V, r \in R \quad (4.5)$$

$$\sum_{v \in V} zat_{ijv} = 1 \quad \text{pro } i \in I, j \in J \quad (4.6)$$

$$\sum_{v \in V} zta_{jiv} = 1 \quad \text{pro } i \in I, j \in J \quad (4.7)$$

$$xa_i \leq aa_i \quad \text{pro } i \in I \quad (4.8)$$

$$xt_{jr} \leq at_j \quad \text{pro } j \in J, r \in R \quad (4.9)$$

$$ya_i \leq ba_i \quad \text{pro } i \in I \quad (4.10)$$

$$yt_{jr} \leq bt_j \quad \text{pro } j \in J, r \in R \quad (4.11)$$

$$\sum_{r \in R} wt_{jr} = 1 \quad \text{pro } j \in J \quad (4.12)$$

$$\sum_{j \in J} wt_{jr} \leq c \quad \text{pro } r \in R \quad (4.13)$$

$$\sum_{r \in R} (st_{ijr} + st_{jir}) \leq 1 \quad \text{pro } i \in J; j \in J; i \neq j \quad (4.14)$$

$$xt_{ir} + e \leq xt_{jr} + M \cdot (1 - st_{ijr}) \quad \text{pro } i \in J; j \in J; r \in R; i \neq j \quad (4.15)$$

$$yt_{ir} + e \leq yt_{jr} + M \cdot (1 - st_{ijr}) \quad \text{pro } i \in J; j \in J; r \in R; i \neq j \quad (4.16)$$

$$yt_{jr} - xt_{jr} \geq p \cdot wt_{jr} \quad \text{pro } j \in J; r \in R \quad (4.17)$$

$$xt_{jr} \leq q \cdot wt_{jr} \quad \text{pro } j \in J; r \in R \quad (4.18)$$

$$wt_{ir} + wt_{jr} = rt_{ijr} + tt_{ijr} \quad \text{pro } i \in J; j \in J; r \in R \quad (4.19)$$

$$st_{ijr} + st_{jir} = rt_{ijr} \quad \text{pro } i \in J; j \in J; r \in R \quad (4.20)$$

$$rt_{ijr} \leq tt_{ijr} \quad \text{pro } i \in J; j \in J; r \in R \quad (4.21)$$

$$xa_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \quad (4.22)$$

$$xt_{jr} \geq 0 \quad \text{pro } j \in J, r \in R \quad (4.23)$$

$$ya_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \quad (4.24)$$

$$yt_{jr} \geq 0 \quad \text{pro } j \in J, r \in R \quad (4.25)$$

$$ha_{ij} \geq 0 \quad \text{pro } i \in I, j \in J \quad (4.26)$$

$$ht_{ji} \geq 0 \quad \text{pro } i \in I, j \in J \quad (4.27)$$

$$zat_{ijv} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in I, j \in J, v \in V \quad (4.28)$$

$$zta_{jiv} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in I, j \in J, v \in V \quad (4.29)$$

$$wt_{ir} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in J; r \in R \quad (4.30)$$

$$rt_{ijr} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in J; j \in J; r \in R \quad (4.31)$$

$$tt_{ijr} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in J; j \in J; r \in R \quad (4.32)$$

$$st_{ijr} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in J; j \in J; r \in R \quad (4.33)$$

Výraz (4.1) reprezentuje účelovou funkci – celkovou časovou ztrátu všech přestupujících cestujících v obou směrech. Skupiny podmínek (4.2) a (4.3) reprezentují situaci, že pokud odjíždějící spoj v jízdním řádu ujíždí příjíždějícímu spoji, pak přestupní vazba nevzniká. Další skupiny podmínek (4.4) a (4.5) zajišťují, že pokud přestupní vazba vznikne, kvantifikují se časové ztráty přestupujících cestujících. Skupiny podmínek (4.6) a (4.7) pak zajišťují, že z každého příjíždějícího spoje lze přestoupit na právě jeden spoj do každého odjíždějícího směru. Skupiny podmínek (4.8) – (4.11) pak zajistí, že časové posuny příjíždějících a odjíždějících spojů se realizují v přípustných mezích. Skupiny podmínek (4.12) – (4.21) se vztahují k přiřazení tramvajových linek manipulačním kolejím na tramvajovém obratišti a zachování příjezdů a odjezdů vozidel těchto linek ve stejném pořadí. Skupiny podmínek (4.22) – (4.33) jsou obligatorními podmínkami a vymezují definiční obory proměnných.

5.4. Úseková koordinace

Cílem časové koordinace spojů na úsecích dopravních sítí je zajistit na úsecích pojížděných více linkami pokud možno co nejvyšší pravidelnost z hlediska dopravní nabídky, tedy najít stav, při kterém budou spoje linek obsluhujících daný úsek jezdit v pravidelných intervalech. Této pravidelnosti ale nelze vždy dosáhnout, například v případě, že spoje jednotlivých linek disponují intervalem 20 minut a že daný úsek je obsluhován třemi linkami. V této situaci jsou optimální intervaly mezi spoji těchto linek 7, 7 a 6 minut. Úsekovou koordinaci lze opět řešit pomocí matematického modelu, pro který jsou klíčové vstupní údaje o množině spojů obsluhujících daný úsek, nejdříve možných časech odjezdů a maximálních možných posunech daných spojů.

Chceme-li dosáhnout rovnoměrnosti nejen mezi spoji vzájemně, ale také vztahmo k začátku a konci koordinačního období, dodáme do všech následujících přístupů fiktivní spoje, které umístíme do časů odpovídajících začátku a konci koordinačního období a přidělíme jim nulový maximální časový posun.

Při úsekové koordinaci můžeme zvolit tři možné přístupy:

- minimalizovat maximální interval mezi dvěma po sobě jedoucími spoji,
- maximalizovat minimální interval mezi dvěma po sobě jedoucími spoji,
- minimalizovat rozdíl mezi maximálním a minimálním intervalem mezi dvěma po sobě jedoucími spoji.

5.4.1. Obecný matematický model pro úsekovou koordinaci – přístup minimalizace maximálního rozestupu mezi dvěma sousedními spoji

Rekapitulace symbolů použitých v matematickém modelu a jejich význam:

I ... množina koordinovaných spojů,

I_0 ... rozšířená množina koordinovaných spojů (o fiktivní spoje na začátku a konci koordinačního období) - $I_0 = I \cup \{0; n + 1\}$,

t_i ... nejdříve možná časová poloha spoje $i \in I_0$ v místě koordinace,

a_i ... maximální časový posun spoje $i \in I$ v místě koordinace,

x_i ... časový posun spoje $i \in I$ v místě koordinace,

h ... maximální rozestup mezi dvěma po sobě jedoucimi spoji v místě koordinace.

Matematický model – minimalizace maximálního rozestupu mezi dvěma sousedními spoji:

$$\min f(x, h) = h \quad (5.1)$$

za podmínek

$$t_1 + x_1 - t_0 \leq h \quad (5.2)$$

$$t_{i+1} + x_{i+1} - (t_i + x_i) \leq h \quad i \in I \setminus \{n\} \quad (5.3)$$

$$t_{n+1} + x_{n+1} - t_n \leq h \quad (5.4)$$

$$x_i \leq a_i \quad \text{pro } i \in I \quad (5.5)$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \quad (5.6)$$

$$h \geq 0 \quad (5.7)$$

Výraz (5.1) reprezentuje účelovou funkci matematického modelu, ve kterém minimalizujeme maximální rozestup mezi dvěma sousedními spoji. Skupina podmínek (5.2) – (5.4) zajišťují vazby mezi časovými polohami jednotlivých spojů s časovými posuny těchto spojů a hodnotou účelové funkce. Skupina podmínek (5.5) zajistí, že časové posuny jednotlivých spojů budou realizovány v přípustných mezích. Skupiny podmínek (5.6) a (5.7) vymezují definiční obory proměnných vystupujících v modelu.

5.4.2. Obecný matematický model pro úsekovou koordinaci – přístup maximalizace minimálního rozestupu mezi dvěma sousedními spoji

Rekapitulace symbolů použitých v matematickém modelu a jejich význam:

I ... množina koordinovaných spojů,

I_0 ... rozšířená množina koordinovaných spojů (o fiktivní spoje na začátku a konci
koordinačního období) - $I_0 = I \cup \{0; n + 1\}$

t_i ... nejdříve možná časová poloha spoje $i \in I_0$ v místě koordinace,

a_i ... maximální časový posun spoje $i \in I$ v místě koordinace,

x_i ... časový posun spoje $i \in I$ v místě koordinace

d ... minimální rozestup mezi dvěma po sobě jedoucimi spoji v místě koordinace.

Matematický model – minimalizace maximálního rozestupu mezi dvěma
sousedními spoji

$$\max f(x, d) = d \quad (6.1)$$

za podmínek

$$t_1 + x_1 - t_0 \geq d \quad (6.2)$$

$$t_{i+1} + x_{i+1} - (t_i + x_i) \geq d \quad i \in I \setminus \{n\} \quad (6.3)$$

$$t_{n+1} + x_{n+1} - t_n \geq d \quad (6.4)$$

$$x_i \leq a_i \quad \text{pro } i \in I \quad (6.5)$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \quad (6.6)$$

$$d \geq 0 \quad (6.7)$$

Výraz (6.1) reprezentuje účelovou funkci matematického modelu, ve kterém maximalizujeme minimální rozestup mezi dvěma sousedními spoji. Skupina podmínek (6.2) – (6.4) zajišťují vazby mezi časovými polohami jednotlivých spojů s časovými posuny těchto spojů a hodnotou účelové funkce. Skupina podmínek (6.5) zajistí, že časové posuny jednotlivých spojů budou realizovány v přípustných mezích. Skupiny podmínek (6.6) a (6.7) vymezují definiční obory proměnných vystupujících v modelu.

5.4.3. Obecný matematický model pro úsekovou koordinaci – kombinace dvou předešlých přístupů – minimalizace maximálního rozestupu a maximalizace minimálního rozestupu mezi dvěma po sobě jedoucimi spoji

I ... množina koordinovaných spojů,

I_0 ... rozšířená množina koordinovaných spojů (o fiktivní spoje na začátku a konci
koordinačního období) - $I_0 = I \cup \{0; n + 1\}$

t_i ... nejdříve možná časová poloha spoje $i \in I_0$ v místě koordinace,

a_i ... maximální časový posun spoje $i \in I$ v místě koordinace,

x_i ... časový posun spoje $i \in I$ v místě koordinace

d ... minimální rozestup mezi dvěma po sobě jedoucími spoji v místě koordinace,

h ... maximální rozestup mezi dvěma po sobě jedoucími spoji v místě koordinace.

Matematický model – minimalizace maximálního rozestupu mezi dvěma sousedními spoji

$$\max f(x, d, h) = h - d \quad (7.1)$$

za podmínek

$$t_1 + x_1 - t_0 \geq d \quad (7.2)$$

$$t_1 + x_1 - t_0 \leq h \quad (7.3)$$

$$t_{i+1} + x_{i+1} - (t_i + x_i) \geq d \quad i \in I \setminus \{n\} \quad (7.4)$$

$$t_{i+1} + x_{i+1} - (t_i + x_i) \leq h \quad i \in I \setminus \{n\} \quad (7.5)$$

$$t_{n+1} + x_{n+1} - t_n \geq d \quad (7.6)$$

$$t_{n+1} + x_{n+1} - t_n \leq h \quad (7.7)$$

$$x_i \leq a_i \quad \text{pro } i \in I \quad (7.8)$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \quad (7.9)$$

$$d \geq 0 \quad (7.10)$$

$$h \geq 0 \quad (7.11)$$

Výraz (7.1) reprezentuje účelovou funkci matematického modelu, ve kterém minimalizujeme rozdíl mezi maximálním a minimálním rozestupem mezi dvěma sousedními spoji. Skupina podmínek (7.2) – (7.7) zajišťují vazby mezi časovými polohami jednotlivých spojů s časovými posuny těchto spojů a hodnotou účelové funkce. Skupina podmínek (7.8) zajistí, že časové posuny jednotlivých spojů budou realizovány v přípustných mezích. Skupiny podmínek (7.9), (7.10) a (7.11) vymezují definiční obory obou proměnných.

5.4.4. Výběr přístupu k úsekové koordinaci

V této diplomové práci byl pro současnou koordinaci vybraných úseků použit model maximalizující minimální rozestupy mezi spoji. Tento přístup je dále kombinován s tzv. kaskádovým přístupem, viz podkapitola 5.4.5.

5.4.5. Kaskádový přístup

Kaskádový přístup je takový přístup optimalizace, který umožňuje na základě dílčích výsledků dodatečné zlepšování aktuálních výsledků týkající se rovnoměrnosti nabídky spojů na řešených úsecích. Princip tohoto přístupu spočívá v opakovaném řešení upravovaných rozestupů mezi jednotlivými spoji, u kterých ještě existuje potenciál zlepšení (větší rovnoměrnosti).

5.4.6. Postup řešení kaskádového přístupu pro úlohu o maximalizaci minimálního rozestupu

Postup řešení kaskádového přístupu je následující. Matematický model bude v této fázi doplněn o novou proměnnou w_i , která bude definovat vazební podmínky, jež umožní měnit dolní hranici d tak, abychom získali v dalších výpočtech lepšího řešení, než bylo dosaženo v předchozím kroku. Dále se zafixují ty podmínky, u nichž už není možné žádné další zlepšení dolní hranice účelové funkce. Tento krok se provede tak, že dolní hranice u daných podmínek se nahradí konstantou, která byla optimalizačním software v aktuálním kroku vypočtena. V této fázi optimalizační výpočet proběhne znovu s již zafixovanými podmínkami a celý proces se opakuje do té doby, dokud optimalizační software nenabízí u žádné z podmínek viditelné zlepšení, tedy to té doby, dokud nejsou všechny podmínky zafixovány a dolní hranice u podmínek nejsou nahrazeny konstantou.

Matematický model s kaskádovým přístupem, ve kterém se maximalizuje minimální rozestup mezi dvěma sousedními spoji

$$\max f(x, d, w) = d + \sum_{i \in I \cup \{n+1\}} w_i \quad (8.1)$$

za podmínek

$$t_1 + x_1 - t_0 \geq d + w_1 \quad (8.2)$$

$$t_{i+1} + x_{i+1} - (t_i + x_i) \geq d + w_{i+1} \quad \text{pro } i \in I \setminus \{n\} \quad (8.3)$$

$$t_{n+1} - (t_n + x_n) \geq d + w_{n+1} \quad (8.4)$$

$$x_i \leq a_i \quad \text{pro } i \in I \quad (8.5)$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \quad (8.6)$$

$$d \geq 0 \quad (8.7)$$

$$w_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \cup \{n + 1\} \quad (8.8)$$

Výraz (8.1) opět reprezentuje účelovou funkci matematického modelu, ve kterém maximalizujeme minimální rozestup mezi dvěma sousedními spoji. Skupiny podmínek (8.2) – (8.4) zajišťují vazby mezi časovými polohami jednotlivých spojů, časovými posuny těchto spojů a hodnotou účelové funkce. Skupina podmínek (8.5) reprezentuje situaci, že časové posuny jednotlivých spojů budou realizovány v přípustných mezích. Skupiny podmínek (8.6), (8.7) a (8.8) vymezují definiční obory všech proměnných. Aby nedošlo ke kritickému zkreslení účelové funkce (aby bylo možno odlišit skutečnou hodnotu optimalizačního kritéria od hodnot identifikujících možnosti zlepšení), volí se maximální hodnota proměnné w_i v takové výši, aby po získání optimálního řešení bylo na první pohled identifikovatelné, které podmínky je nutné zafixovat, a aby nebyla nijak zásadně zkreslena hodnota účelové funkce. Pro potřeby optimalizace úlohy časové koordinace na vybraných úsecích je zvolena pro další výpočty maximální hodnota $w_i = 0,001$. Podmínka (8.9) zajišťující tuto skutečnost pak vypadá následovně:

$$w_i \leq 0,001 \quad \text{pro } i \in I \cup \{n + 1\} \quad (8.9)$$

V reálné dopravní praxi může být ale také například požadováno, že spoje dvou linek $i \in I$ a $j \in I$ musí odjíždět ve stejnou časovou polohu (např. z důvodu vytvořené uzlové koordinace). Toho docílíme zavedením následující podmínky:

$$x_i = x_j \quad (8.10)$$

Aby byla tato podmínka splněna, musí být zároveň zajištěno, že nejdříve možné časové polohy těchto spojů budou mít stejnou hodnotu, tato skutečnost bude zajištěna následující podmínkou:

$$t_i = t_j \quad (8.11)$$

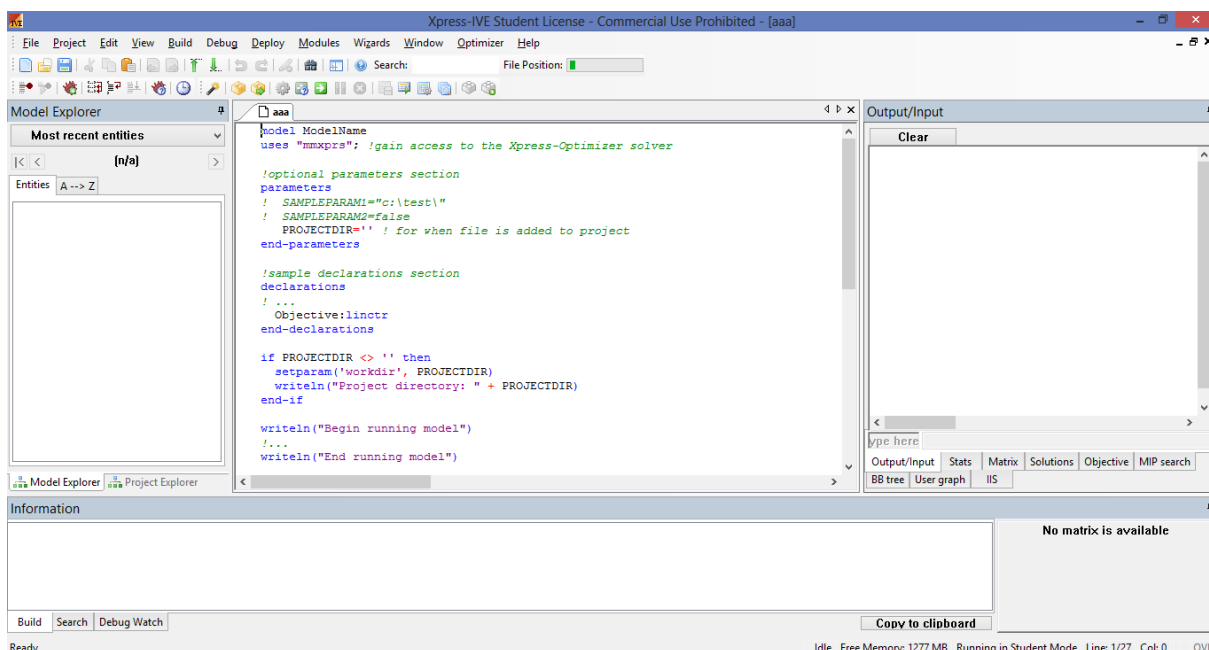
6 Řešení zformulovaných modelů

Kapitola byla zpracována s využitím práce [3].

Pro řešení zformulovaných modelů lze použít celou řadu optimalizačních software. V této diplomové práci bude k řešení navržených modelů využit optimalizační software Xpress – IVE. Ten je schopen vyřešit lineární matematické modely, je určený pro operační systém Windows a pro vyřešení daného problému užívá programovací jazyk MOSEL.

Pokud je navržený model správně transformován do textu programu, model neobsahuje logické nedostatky a je k dispozici dostatečně výkonné hardwarové vybavení, potom software Xpress-IVE nalezne optimální řešení (pokud existuje) pro zformulované optimalizační úlohy.

Pracovní prostředí optimalizačního software Xpress – IVE, se kterým bude pracováno, má následující podobu, viz Obrázek 4:



Obrázek 4: Pracovní prostředí optimalizačního software Xpress – IVE

Jak je patrné z Obrázku 4, v horní části nalezne uživatel software Xpress roletové menu, pod nímž se nachází panel nástrojů a ovládací panel. Ve střední části jsou viditelná tři okna. Okno po levé straně disponuje přehledem prvků, které v daném modelu vystupují a okno po pravé straně pak po ukončení výpočtu (požádá-li si o to tvůrce programu v textu programu) slouží pro výpis nalezeného optimálního řešení. Prostřední část obrazovky zahrnuje pracovní plochu, která je pak určena pro zapisování textu optimalizačního programu. Pod těmito třemi okny se nachází stavový řádek, který udává informace o správnosti textu programu, případně slouží k identifikaci nedostatků v textu programu.

Každý matematický model řešený v optimalizačním programu Xpress – IVE má jednotnou strukturu a skládá se z několika částí.

Nejprve je nutné zadat název modelu. Ten by měl být pro optimalizační program napsán bez diakritiky, a pokud je název složen z více slov, které uživatel vyžaduje pro přehlednost zapsat odděleně, je nezbytné jednotlivá slova od sebe oddělit podtržítkem. Před název programu se udává ještě klíčové slovo *model* sloužící k formálnímu zahájení textu programu.

model poradi_tramvaj_na_vice_kolejich

Druhý řádek textu programu obsahuje následující zápis příkazu:

uses "mmxprs";

V programu je také možné pomocí speciálního příkazu vložit do textu jakékoliv poznámky, které jsou určeny pouze pro potřeby uživatele, a v nichž již nejsou kladeny žádné požadavky na diakritiku apod., jako tomu bylo u příkazů výše zmíněných. Poznámky do textu programu se zadávají následovně:

! text poznámky

Po úvodu následuje deklarační část, kde je nezbytné identifikovat všechny konstanty typu pole a všechny proměnné. Veličinami typu pole se rozumí matice, vektory apod. V modelu je veličinou typu pole každá veličina, která využívá indexů, např. x_{ik} , y_{ik} apod. Deklarační část začíná klíčovým slovem:

declarations

Pro správnou identifikaci toho, zda se jedná o konstantu či proměnnou, se využívá zadaného označení. Pro konstanty typu pole se využívá označení *of real* a pro proměnné typu pole označení *of mpvar*. Po zadání jakékoliv veličiny typu pole je vyžadováno zapsat klíčové slovo *array*. Zápis konstant a proměnných typu pole v řešené úloze je následující:

x: array(linka, kolej) of mpvar

y: array(linka, kolej) of mpvar

s: array(linka, linka, kolej) of mpvar

w: array(linka, kolej) of mpvar

r: array(linka, linka, kolej) of mpvar

t: array(linka, linka, kolej) of mpvar

Deklarační část je uzavřena klíčovým slovem:

end – declarations

Po deklarační části následuje část, v níž se zadávají vstupní hodnoty pro výše uvedené konstanty. To bude provedeno následujícím způsobem:

$a::[]$

$b::[]$

přičemž do hranatých závorek se zapíší konkrétní hodnoty prvků matic.

Prohibitivní konstantu (obecně konstantu, která není typu pole) použitou v účelové funkci (obecně v matematickém modelu) je nutno definovat následujícím způsobem:

$M = 1000$

Nedílnou součástí každého modelu je soustava omezujících podmínek, která pro řešenou optimalizační úlohu o přiřazení kolejí jednotlivým linkám má tvar:

$$\sum_{k \in R} w_{ik} = 1 \quad \text{pro } i \in I$$
$$\sum_{k \in R} (s_{ijk} + s_{jik}) \leq 1 \quad \text{pro } i \in I; i \in I; i \neq j$$

V optimalizačním programu pak zápis takových podmínek vypadá následovně:

forall (i in linka) sum (k in kolej) w(i,k) = 1

forall (i in linka, j in linka | i <> j) sum (k in kolej) (s(i,j,k) + s(j,i,k)) ≤ 1

Zbývá ještě doplnit zápisy tzv. obligatorních podmínek, tedy podmínek vymezujících definiční obory proměnných. Bivalentní proměnné použité v řešené úloze se definují následovně:

forall (i in linka, j in linka, k in kolej) s(i,j,k) is_binary

Kdyby proměnná $s(i,j,k)$ měla nabývat nezáporných celočíselných hodnot, potom se bude definovat následovně:

forall (i in linka, j in linka, k in kolej) s(i,j,k) is_integer

Poslední možností je pak situace, kdy je proměnná nezáporná, a v tomto případě pak pro ni není definován speciální příkaz, protože optimalizační software má nezápornost proměnných předdefinovanu. Kdyby však přes tento fakt uživatel chtěl definiční obor – množinu nezáporných čísel do textu programu zapsat, potom má možnost použít zápisu:

$$\text{forall } (i \text{ in linka}, j \text{ in linka}, k \text{ in kolej}) s(i, j, k) \geq 0$$

Po zadání daných podmínek do textu programu je již možno zapsat účelovou funkci. Jedna z funkcí zformulovaných v předložené práci je například:

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in R} (y_{ik} - x_{ik})$$

Účelovou funkci, v níž minimalizujeme celkovou dobu pobytu linek na obratišti, pak do programu Mosel zapíšeme následujícím způsobem:

$$HUF := \text{sum}(i \text{ in linka}, k \text{ in kolej})(y(i, k) - x(i, k))$$

Pro optimalizaci jakéhokoliv problému hledáme zpravidla extrém (minimum, maximum) dané funkce, a tak je nutné i tento extrém do textu programu definovat. Požadavkem na minimalizaci dané funkce zapíšeme do textu programu následovně:

$$\text{minimize}(HUF)$$

Požadavkem na maximalizaci funkce zapíšeme do textu programu následovně:

$$\text{maximize}(HUF)$$

Poslední část textu programu obsahuje požadavky na výpisy výsledků, které se zobrazí v okně na pravé straně pracovního okna. K vypsání výsledných hodnot optimalizačního výpočtu se používají dva příkazy - *getobjval* a *getsol*. Příkaz *getobjval* definuje požadavek na výpis hodnoty účelové funkce a příkaz *getsol* definuje požadavek na výpis proměnných, případně hodnot jiných výrazů, které proměnné obsahují. Pro řešený problém optimalizace přidělování kolejí jednotlivým linkám vypadá zápis v textu programu takto:

$$\text{writeln}("HUF \text{ je } ", \text{getobjval})$$

$$\text{forall}(i \text{ in linka}, k \text{ in kolej}) \text{writeln}("w(", i, ", ", k, ") = ", \text{getsol}(w(i, k)))$$

$$\text{forall}(i \text{ in linka}, j \text{ in linka}, k \text{ in kolej} | \text{getsol}(s(i, j, k)) = 1) \text{writeln}("s(", i, ", ", j, ", ", k, ") = ", \text{getsol}(s(i, j, k)))$$

$$\text{forall}(i \text{ in linka}, k \text{ in kolej}) \text{writeln}("x(", i, ", ", k, ") = ", \text{getsol}(x(i, k)))$$

$$\text{forall}(i \text{ in linka}, k \text{ in kolej}) \text{writeln}("y(", i, ", ", k, ") = ", \text{getsol}(y(i, k)))$$

Text programu se vždy uzavře klíčovým slovem:

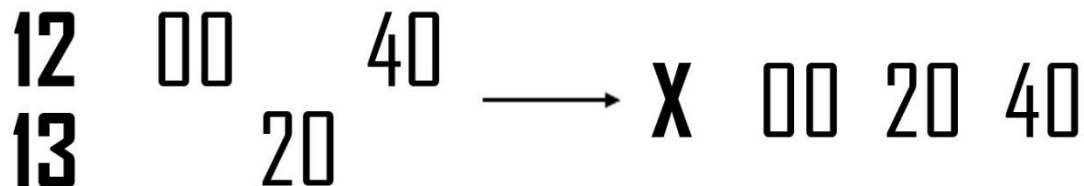
$$\text{end} - \text{model}$$

7 Současný stav po provedených zjednodušeních

V předchozím textu bylo uvedeno, že bude přistoupeno k určitým zjednodušením. Tím prvním je zjednodušení v časové rovině, které bude uvedeno v následujícím textu.

Spoje autobusových linek č. 26 a č. 59 přijíždějí a odjíždějí do/z přestupního uzlu Dubina z/do stejného směru, a tak budou v rámci časové koordinace pro zjednodušení formálně sloučeny do jedné linky, tzn., že jejich spoje budou chápány jako spoje stejné linky. To je možné, jelikož u autobusové linky č. 26 se střídá 40minutový s 80minutovým intervalem, zatímco autobusová linka č. 59 obsluhuje přestupní uzel s intervalem 120 minut, přičemž spoj této linky je vložen právě doprostřed toho časového okna, které vznikne při 80minutovém intervalu autobusové linky č. 26. Tím vzniká situace, díky které je ve směru, který je výše zmíněnými linkami obsluhován, zajištěn pravidelný 40 minutový interval. Aktuální příjezdy byly uvedeny v Tabulce 1 prezentované v kapitole 2

Po realizaci fiktivního přesunu určitých spojů autobusových linek do jiných časových poloh a sloučení dvou po sobě jdoucích hodin do jedné, vznikne i na kumulované autobusové lince fiktivní interval 20 minut. Princip vytváření fiktivní výpočetní hodiny je znázorněn na Obrázku 5.



Obrázek 5: Princip vytváření fiktivní výpočetní hodiny

To je možné, jelikož hodina příjezdu u autobusových linek není rozhodující. Původní časovou koordinaci realizovanou v rámci dvou hodin, jak je uvedeno na Obrázku 5, lze nahradit fiktivní hodinou. Když bude např. k příjezdu spoje např. autobusové linky č. 26 v čase 12:00 koordinován odjezd navazujících tramvajových linek do časové polohy 12:05, dojde při zachování taktové dopravy jak u autobusových tak tramvajových linek, k posunu o stejnou dobu i u všechny následujících i předchozích odjezdů autobusových (12:40, 13:20 atp.) i tramvajových linek (12:25, 12:45 atp.). Z toho důvodu lze časovou polohu aktuálního příjezdu autobusové linky fiktivně přenést do polohy na časové ose 12:00. Koordinace spojů této kumulované linky bude provedena na páteřní tramvajové linky, na kterých jsou linkové intervaly 20 minut.

Po aplikaci tohoto zjednodušení je zřejmé, že při koordinaci spojů autobusových linek č. 26 a č. 59 do směru Stará Bělá dojde například k časovému posunu spoje autobusové linky č. 26 do časové polohy 12:00. Aby byla znovu zachována taktová doprava, budou následující spoje autobusových linek č. 26 a č. 59 posunuty do časových poloh 12:20 a 12:40. Z tohoto důvodu je tedy možné redukovat časovou koordinaci v přestupním uzlu z jedné hodiny pouze na dvacetiminutový interval, který je zaručen u tramvajových linek, na které by měla být zajištěna přestupní vazba.

Stejného zjednodušení pak bude použito i v opačném směru při přestupu z tramvajových linek na linky autobusové.

Linka	Směr	Odjezd
26	Stará Bělá	11:07
26	Stará Bělá	11:47
59	Stará Bělá	12:27
26	Stará Bělá	13:07
26	Stará Bělá	13:47
59	Stará Bělá	14:07

Tabulka 5: Aktuální odjezdy autobusových spojů do směru Stará Bělá z přestupního uzlu Dubina

Linka	Směr	Odjezd
26	Stará Bělá	11:07
59	Stará Bělá	11:27
26	Stará Bělá	11:47

Tabulka 6: Odjezdy autobusových spojů do směru Stará Bělá z přestupního uzlu Dubina po aplikaci zjednodušení

8 Výpočetní experimenty

V kapitole 5 byly zformulovány matematické modely pro řešení zadaných optimalizačních úloh – úlohy o časové koordinaci v přestupním uzlu, úlohy o optimalizaci přiřazení tramvajových linek na obratišti jednotlivým manipulačním kolejím a úlohy o úsekové koordinaci spojů. Zformulované matematické modely budou v této části diplomové práce využity pro předem definovaný přestupní uzel, který je obsluhován zadanou množinou linek a vybrané úseky dopravní sítě.

8.1. Vstupní údaje pro optimalizační úlohy

Aby bylo možné realizovat optimalizační výpočet a získat tak optimální řešení daného matematického modelu lineárního programování, je nezbytně nutné mít k dispozici vstupní údaje vyžadované matematickými modely. Pro první řešenou optimalizační úlohu (časovou koordinaci v přestupním uzlu z autobusových linek na páteřní tramvajové linky a naopak) jsou k dispozici podklady zahrnující nejdříve možné příjezdy a odjezdy spojů tramvajových i autobusových linek, maximální hodnoty jejich možných časových posunů, přestupní doby a počty cestujících přestupujících mezi spoji tramvajových a autobusových linek v obou směrech. Druhá optimalizační úloha zabývající se úsekovou koordinací na vybraných úsecích tramvajové sítě pak vyžaduje vstupní údaje zahrnující nejdříve možné příjezdy a odjezdy spojů tramvajových z první společné zastávky koordinovaného úseku a maximální hodnoty časových posunů jednotlivých spojů na daných úsecích.

Textu programu v optimalizačním software Xpress-IVE uvedený v podkapitole 8.2 odpovídá podmínkám přestupního uzlu Dubina. Každá tramvajová i autobusová linka je identifikována jedním příjíždějícím a dvěma odjíždějícími spoji jedoucými v taktu 20 minut. Autobusové spoje příjíždějí ze dvou směrů (z jednoho směru jeden spoj reprezentující linku č. 26 a č. 59, ze druhého směru jeden spoj reprezentující linku č. 55). Analogicky spoje autobusových linek odjíždějí do dvou směrů (do jednoho směru dva spoje reprezentující linky č. 26 a č. 59, do druhého směru dva spoje reprezentující linku č. 55).

Stejně tak tomu je u tramvajových linek. Koordinace spojů autobusových linek probíhá se spoji tramvajových linek č. 1 a 17. Tramvajové spoje příjíždějí ze dvou směrů (z jednoho směru jeden spoj linky č. 1, ze druhého směru jeden spoj reprezentující linku č. 17). Analogicky spoje tramvajových linek odjíždějí do dvou směrů (do jednoho směru dva spoje linky č. 1 a do druhého směru dva spoje linky č. 17).

V textu programu uvedeného v podkapitole 8.2 budou linky dočasně přečíslovány. Linky č. 1 a č. 2 v modelu reprezentují autobusové linky (26/59 a 55) a linky č. 3 a č. 4 reprezentují tramvajové linky (1 a 17).

V modelu je uvažováno s minimálním prostojem tramvajových linek na obratišti ve výši 5 minut.

8.2. Zápis textu programu o časové koordinaci v přestupním uzlu v programu Xpress-IVE s přiřazením kolejí jednotlivým tramvajovým linkám

```
model casova_koordinace
```

```
uses "mmxprs";
```

```
declarations
```

```
m = 4
```

```
w = 2
```

```
p = 3
```

```
smer = 1..m
```

```
spoj = 1..w
```

```
kolej = 1..p
```

```
xa: array (1..2) of mpvar
```

```
xt: array (3..4, kolej) of mpvar
```

```
aa: array(1..2) of real
```

```
at: array(3..4) of real
```

```
bt: array(3..4) of real
```

```
ba: array(1..2) of real
```

```
fa: array(1..2,3..4) of real
```

```
ft: array(3..4,1..2) of real
```

```
ha: array(1..2,3..4) of mpvar
```

```
ht: array(3..4,1..2) of mpvar
```

```
yt: array (3..4, kolej) of mpvar
```

```
ya: array (1..2) of mpvar
```

```

zat: array(1..2,3..4, spoj) of mpvar

zta: array(3..4,1..2, spoj) of mpvar

todt: array(3..4, spoj) of real

toda: array(1..2, spoj) of real

tpa: array(1..2) of real

tpt: array(3..4) of real

st: array(3..4,3..4, kolej) of mpvar

wt: array(3..4, kolej) of mpvar

rt: array(3..4,3..4, kolej) of mpvar

tt: array(3..4,3..4, kolej) of mpvar

end – declarations

aa: : [19,19]

at: : [19,19]

bt: : [19,19]

ba: : [19,19]

fa: : [122,220,320,454]

ft: : [56,44,123,125]

tpa: : [0,0]

toda: : [0,0]

takt: = 20

forall (j in 3..4) todt(j, 1): = 0

forall (i in 1..2) toda(i, 1): = 0

forall (j in 3..4) todt(j, 2): = todt(j, 1) + takt

forall (i in 1..2) toda(i, 2): = toda(i, 1) + takt

tpr: = 5

```

$e := 1$

$M := 10000000$

$\text{forall } (i \text{ in } 1..2, j \text{ in } 3..4, v \text{ in spoj}, k \text{ in kolej}) \text{todt}(j, v) + \text{yt}(j, k) - \text{tpa}(i) - \text{xa}(i) - \text{tpr} >$
 $= M * (\text{zat}(i, j, v) - 1)$

$\text{forall } (j \text{ in } 3..4, v \text{ in spoj}, i \text{ in } 1..2, k \text{ in kolej}) \text{toda}(i, v) + \text{ya}(i) - \text{tpt}(j) - \text{xt}(j, k) - \text{tpr} >$
 $= M * (\text{zta}(j, i, v) - 1)$

$\text{forall } (i \text{ in } 1..2, j \text{ in } 3..4, v \text{ in spoj}, k \text{ in kolej}) \text{todt}(j, v) + \text{yt}(j, k) - \text{tpa}(i) - \text{xa}(i) - \text{tpr} <$
 $= \text{ha}(i, j) + M * (1 - \text{zat}(i, j, v))$

$\text{forall } (j \text{ in } 3..4, v \text{ in spoj}, i \text{ in } 1..2, k \text{ in kolej}) \text{toda}(i, v) + \text{ya}(i) - \text{tpt}(j) - \text{xt}(j, k) - \text{tpr} <$
 $= \text{ht}(j, i) + M * (1 - \text{zta}(j, i, v))$

$\text{forall } (i \text{ in } 1..2, j \text{ in } 3..4) \text{sum } (v \text{ in spoj}) \text{zat } (i, j, v) = 1$

$\text{forall } (j \text{ in } 3..4, i \text{ in } 1..2) \text{sum } (v \text{ in spoj}) \text{zta } (j, i, v) = 1$

$\text{forall } (i \text{ in } 1..2) \text{xa}(i) \leq \text{aa}(i)$

$\text{forall } (j \text{ in } 3..4, k \text{ in kolej}) \text{yt}(j, k) \leq \text{bt}(j)$

$\text{forall } (j \text{ in } 3..4, k \text{ in kolej}) \text{xt}(j, k) \leq \text{at}(j)$

$\text{forall } (i \text{ in } 1..2) \text{ya}(i) \leq \text{ba}(i)$

$\text{forall } (i \text{ in } 1..2) \text{xa}(i) \geq 0$

$\text{forall } (j \text{ in } 3..4, k \text{ in kolej}) \text{yt}(j, k) \geq 0$

$\text{forall } (j \text{ in } 3..4, k \text{ in kolej}) \text{xt}(j, k) \geq 0$

$\text{forall } (i \text{ in } 1..2) \text{ya}(i) \geq 0$

$\text{forall } (i \text{ in } 1..2, j \text{ in } 3..4) \text{ha}(i, j) \geq 0$

$\text{forall } (j \text{ in } 3..4, i \text{ in } 1..2) \text{ht}(j, i) \geq 0$

$\text{forall } (i \text{ in } 3..4) \text{sum } (k \text{ in kolej}) \text{wt}(i, k) = 1$

$\text{forall } (k \text{ in kolej}) \text{sum } (i \text{ in } 3..4) \text{wt}(i, k) \leq 2$

$\text{forall } (i \text{ in } 3..4, j \text{ in } 3..4 | i \neq j) \text{sum } (k \text{ in kolej}) (\text{st}(i, j, k) + \text{st}(j, i, k)) \leq 1$

$\text{forall } (i \text{ in } 3..4, j \text{ in } 3..4, k \text{ in kolej} | i \neq j) \text{xt}(i, k) + e \leq \text{xt}(j, k) + M * (1 - \text{st}(i, j, k))$


```

forall(i in 3..4,j in 3..4,k in kolej|i <> j)yt(i,k) + e <= yt(j,k) + M * (1 - st(i,j,k))

forall(i in 3..4,k in kolej)xt(i,k) <= 19

forall(i in 3..4,k in kolej)yt(i,k) - xt(i,k) >= 5 * wt(i,k)

forall(i in 3..4,j in 3..4,k in kolej|i <> j) wt(i,k) + wt(j,k) = rt(i,j,k) + tt(i,j,k)

forall(i in 3..4,j in 3..4,k in kolej|i <> j) st(i,j,k) + st(j,i,k) = rt(i,j,k)

forall(i in 3..4,j in 3..4,k in kolej|i <> j)rt(i,j,k) <= tt(i,j,k)

forall (i in 1..2,j in 3..4,v in spoj) zat(i,j,v)is_binary

forall (j in 3..4,i in 1..2,v in spoj) zta(j,i,v)is_binary

forall(i in 3..4,j in 3..4,k in kolej)st(i,j,k)is_binary

forall(i in 3..4,k in kolej)wt(i,k)is_binary

forall(i in 3..4,j in 3..4,k in kolej)rt(i,j,k) is_binary

forall(i in 3..4,j in 3..4,k in kolej)tt(i,j,k) is_binary

casova_koordinace:
    = sum (i in 1..2,j in 3..4) fa(i,j) * ha(i,j) + sum (j in 3..4,i in 1..2) ft(j,i)
    * ht(j,i)

minimize (casova_koordinace)

writeln ("casova_ztrata je ",getobjval," min.")

forall (i in 1..2|getsol(xa(i)) >= 0) writeln("xa(",i,") = ",getsol (xa (i)))

forall (j in 3..4,k in kolej|getsol(xt(j,k)) >= 0) writeln("xt(",j,"",k,")
    = ",getsol (xt (j,k)))

forall (j in 3..4,k in kolej|getsol(yt(j,k)) >= 0) writeln("yt(",j,"",k,")
    = ",getsol (yt (j,k)))

forall (i in 1..2|getsol(ya(i)) >= 0) writeln("ya(",i,") = ",getsol (ya (i)))

forall (i in 1..2,j in 3..4,v in spoj|getsol(zat(i,j,v)) > 0) writeln("zat(",i,"",j,"",v,")
    = ",getsol (zat (i,j,v)))

forall (j in 3..4,v in spoj,i in 1..2|getsol(zta(j,i,v)) > 0) writeln("zta(",j,"",i,"",v,")
    = ",getsol (zta (j,i,v)))

```

```

forall (i in 1..2, j in 3..4 | getsol(ha(i,j)) >= 0) writeln("ha(", i, ", ", j, ")
    = ", getsol(ha(i,j)))

forall (j in 3..4, i in 1..2 | getsol(ht(j,i)) >= 0) writeln("ht(", j, ", ", i, ")
    = ", getsol(ht(j,i)))

forall (i in 3..4, k in kolej | getsol(wt(i,k)) >= 0) writeln("wt(", i, ", ", k, ")
    = ", getsol(wt(i,k)))

end – model

```

Řešením matematického uvedeného modelu byly dosaženy následující výsledky:

$xa(1) = 0$	$ya(1) = 5$
$xa(2) = 0$	$ya(2) = 5$
$wt(3,3) = 1$	$wt(4,2) = 1$
$xt(3,3) = 0$	$yt(3,3) = 5$
$xt(4,2) = 0$	$yt(4,2) = 5$

Z dosažených výsledků je patrné, že je matematický model validní, jelikož byly dodrženy podmínky o minimálních dobách pobytů vozidel jednotlivých tramvajových linek na obratišti (5 minut), o přiřazování jedné koleje každé tramvajové lince a také o zachování předepsaných přestupních dob v obou směrech. Výsledky o časových polohách odjezdů a příjezdů tramvajových páteřních linek budou následně použity v navazujícím matematickém modelu o časové koordinaci na vybraných úsecích zadaných společnostmi KODIS.

8.3. Varianty časové koordinace v přestupním uzlu Dubina s možnostmi časové koordinace na přilehlých úsecích

Jak již bylo dříve avizováno, hlavním cílem této diplomové práce je vytvoření takového matematického modelu, který zkoordinuje autobusové a tramvajové spoje, mezi kterými se přestupuje v přestupním uzlu Dubina tak, aby se minimalizovaly časové ztráty přestupujících cestujících ve dnech pracovního volna. Vzhledem k faktu, že model časové koordinace v přestupním uzlu s největší pravděpodobností zajistí shluk příjezdů a odjezdů jednotlivých linek do příslušných směrů do téže časové polohy, je možno jej dále rozšířit o úsekovou časovou koordinaci na společně pojížděných úsecích linkami, které obsluhují také koordinovaný přestupní uzel Ostrava – Dubina. Tramvajová síť

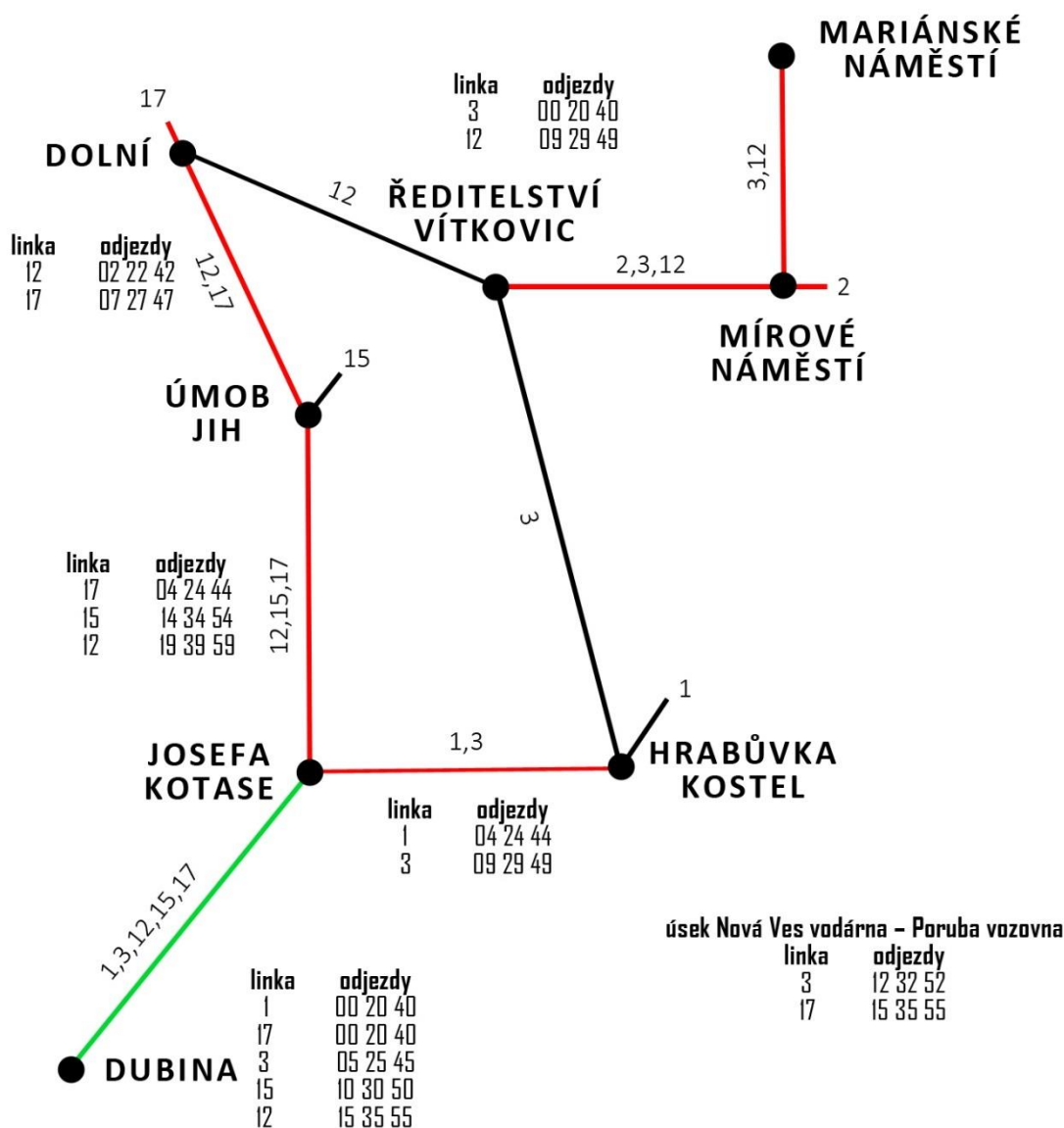
Dopravního podniku Ostrava ovšem v rámci celé své sítě disponuje hned několika úseky (ať už se jedná o úseky bezprostředně navazující na přestupní uzel, nebo o ty úseky, které k němu bezprostředně nenavazují), které jsou obsluhovány alespoň dvěma linkami obsluhující příslušný přestupní uzel. Proto se pro doplňkovou úsekovou časovou koordinaci navazující na časovou koordinaci v přestupním uzlu nabízí několik variant. Společně obsluhované úseky linkami obsluhující dopravní uzel Dubina jsou úseky Dubina – Josefa Kotase, Josefa Kotase – ÚMOB Jih, ÚMOB Jih – Dolní, Josefa Kotase – Hrabůvka kostel a Ředitelství Vítkovic – Mariánské náměstí.

8.3.1. Varianta č. 1

První varianta, stejně jako všechny ostatní, zajišťuje v první řadě časovou koordinaci v přestupním uzlu z autobusových linek č. 26/59 ze směru Stará Bělá a linky č. 55 ze směru Nová Bělá na páteřní tramvajové linky č. 1 směr Centrum a linky č. 17 směr Poruba. Ve společném úseku od přestupního uzlu Dubina se do poslední společné nácestné zastávky Josefa Kotase nacházejí dvě zastávky – Václava Jiříkovského, a Antonína Poledníka; délka úseku 2 km; doba jízdy 4 minuty. V této variantě bude na tomto úseku požadováno vytvoření co nejpravidelnějšího intervalu dopravy. Optimalizační software při časové koordinaci přestupního uzlu zvolí při minimalizaci optimalizačního kritéria, kterým je časová ztráta přestupujících cestujících z autobusových linek na páteřní tramvajové linky, variantu řešení, ve které spoje páteřních tramvajových linek (č. 1 a 17) odjíždějí z přestupního uzlu ve stejný časový okamžik. V této chvíli lze chápat v rámci časového intervalu 20 minut dvě společně odjíždějící linky jako jedinou soupravu (odjezd například v časové poloze 0). Úsek dopravní sítě Dubina – Josefa Kotase je ovšem dále obsluhován tramvajovými linkami č. 3, 12 a 15, které rovněž disponují linkovým intervalem 20 minut, a tak je možné zajistit na tomto úseku pravidelný interval dopravy ve výši 5 minut. Výhodou této varianty je zajištění právě tohoto zcela pravidelného intervalu dopravy na úseku Dubina – Josefa Kotase. Nevýhodou ovšem bude nepravidelnost jak na přilehlých úsecích dopravní sítě (Josefa Kotase – Hrabůvka kostel a Josefa Kotase – ÚMOB Jih), tak na dalších úsecích obsluhovaných spoji alespoň dvou koordinovaných tramvajových linek (jedná se o úseky Ředitelství Vítkovic – Mariánské náměstí, ÚMOB Jih – Dolní a Nová Ves vodárna – Poruba vozovna). Varianta 1 je zobrazena na Obrázku 6, návrhy odjezdů tramvajových linek z přestupního uzlu jsou v Tabulce 7.

Linka	Směr	odjezd z uzlu Dubina
1	Hlavní nádraží	00
17	Vřesinská	00
3	Poruba vozovna	05
15	Výškovice	10
12	Hranečník	15

Tabulka 7: Návrh odjezdů tramvajových linek z uzlu Dubina při variantě 1



Obrázek 6: Vizualizace časové obsluhy společných úseků ve variantě 1

Vzhledem k tomu, že společný úsek (Dubina – Josefa Kotase), na němž jsou vedeny všechny tramvajové linky obsluhující přestupní uzel Dubina (linky 1, 3, 12, 15, 17), je v poměru k celkovým délkám linek a tím i spojenou poptávkou cestujících po pravidelné nabídce spojení linek do ostatních částí města nízký, ztrácí úseková koordinace všech linek

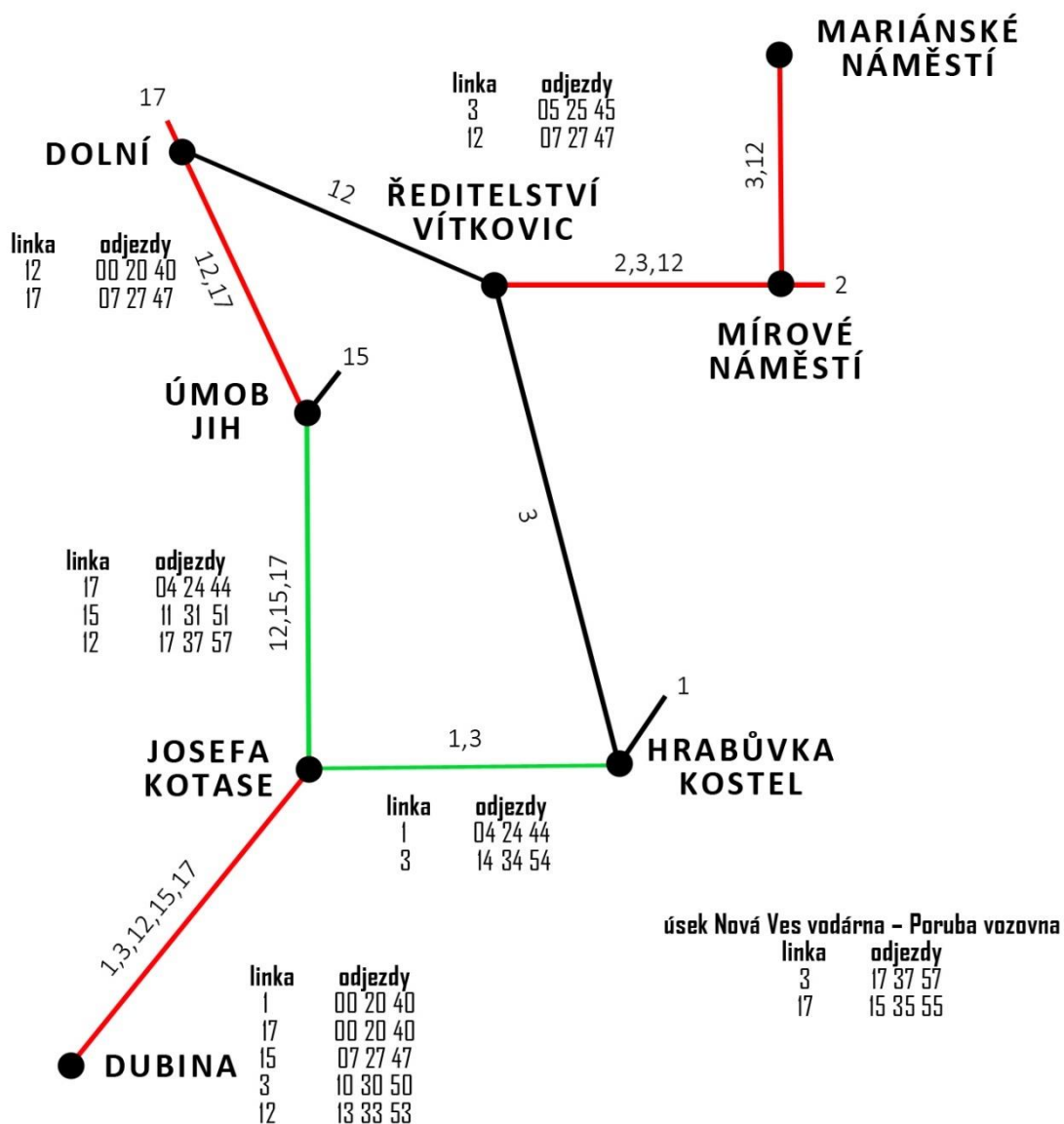
na úseku Dubina – Josefa Kotase svůj význam, jelikož by uspokojila pouze nízkou část cestujících pohybujících se pouze na tomto krátkém úseku.

8.3.2. Varianta č. 2

Druhá varianta, stejně jako všechny ostatní, zajišťuje v první řadě časovou koordinaci v přestupním uzlu z autobusových linek č. 26/59 ze směru Stará Bělá a linky č. 55 ze směru Nová Bělá na páteřní tramvajové linky č. 1 směr Centrum a linky č. 17 směr Poruba a naopak. Tramvajová síť Dopravního podniku Ostrava se za zastávkou Josefa Kotase větví, přičemž tramvajové linky č. 1 a 3 obsluhují dále společný úsek Josefa Kotase – Hrabůvka kostel (dvě společné zastávky všech linek na tomto úseku – Poliklinika a Hrabůvka kostel; délka 1 km; doba jízdy 2 min) a tramvajové linky č. 12, 15 a 17 obsluhují společný úsek Josefa Kotase – ÚMOB Jih (dvě společné zastávky všech linek na tomto úseku – Hotelový dům Hlubina a ÚMOB Jih; délka 1 km; doba jízdy 3 min). V této variantě bude požadován návrh co nejpravidelnějšího intervalu na těchto dvou úsecích při zachování pravidelného linkového intervalu 20 minut na všech tramvajových linkách. Už na první pohled je zřejmé, že na úseku obsluhovaném dvěma linkami je při intervalu 20 minut obou linek ideálním případem situace, v níž je interval dopravy na tomto úseku 10 minut. Na druhém úseku, který je obsluhován třemi linkami, ovšem při zachování elementární časové jednotky jedné minuty není možno vytvořit pravidelný interval dopravy, a tak optimální variantou jsou intervaly dopravy 7, 7 a 6 minut. Výhodou této varianty je zajištění pravidelné obsluhy na úsecích Josefa Kotase – Hrabůvka kostel a Josefa Kotase – ÚMOB Jih, nevýhodou pak nedodržení pravidelnosti na předchozím úseku, který je obsluhován tramvajovými linkami č. 1, 3, 12, 15 a 17, ani na všech dalších společně úsecích obsluhovaných spoji alespoň dvou koordinovaných tramvajových linek (Ředitelství Vítkovic – Mariánské náměstí, ÚMOB Jih – Dolní a Nová Ves vodárna – Poruba vozovna). Varianta 2 je zobrazena na Obrázku 7, návrhy odjezdů tramvajových linek z přestupního uzlu jsou v Tabulce 8.

Linka	Směr	Odjezd z uzlu Dubina
1	Hlavní nádraží	00
17	Vřesinská	00
15	Výškovice	07
3	Poruba vozovna	10
12	Hranečník	13

Tabulka 8: Návrh odjezdů tramvajových linek z uzlu Dubina při variantě 2



Obrázek 7: Vizualizace časové obsluhy společných úseků ve variantě 2

8.3.3. Varianta č. 3

Třetí varianta, stejně jako všechny ostatní, zajišťuje opět v první řadě časovou koordinaci v přestupním uzlu z autobusových linek č. 26/59 ze směru Stará Bělá a linky č. 55 ze směru Nová Bělá na páteřní tramvajové linky č. 1 směr Centrum a linky č. 17 směr Poruba a naopak. Rozšířením této varianty je pak úseková koordinace na úsecích Ředitelství Vítkovic – Mírové náměstí, Mírové náměstí – Mariánské náměstí, případně na obou současně s možností přestupu mezi jednotlivými tramvajovými linkami, které tyto úseky obsluhují.

8.3.3.1.1. Varianta č. 3.1

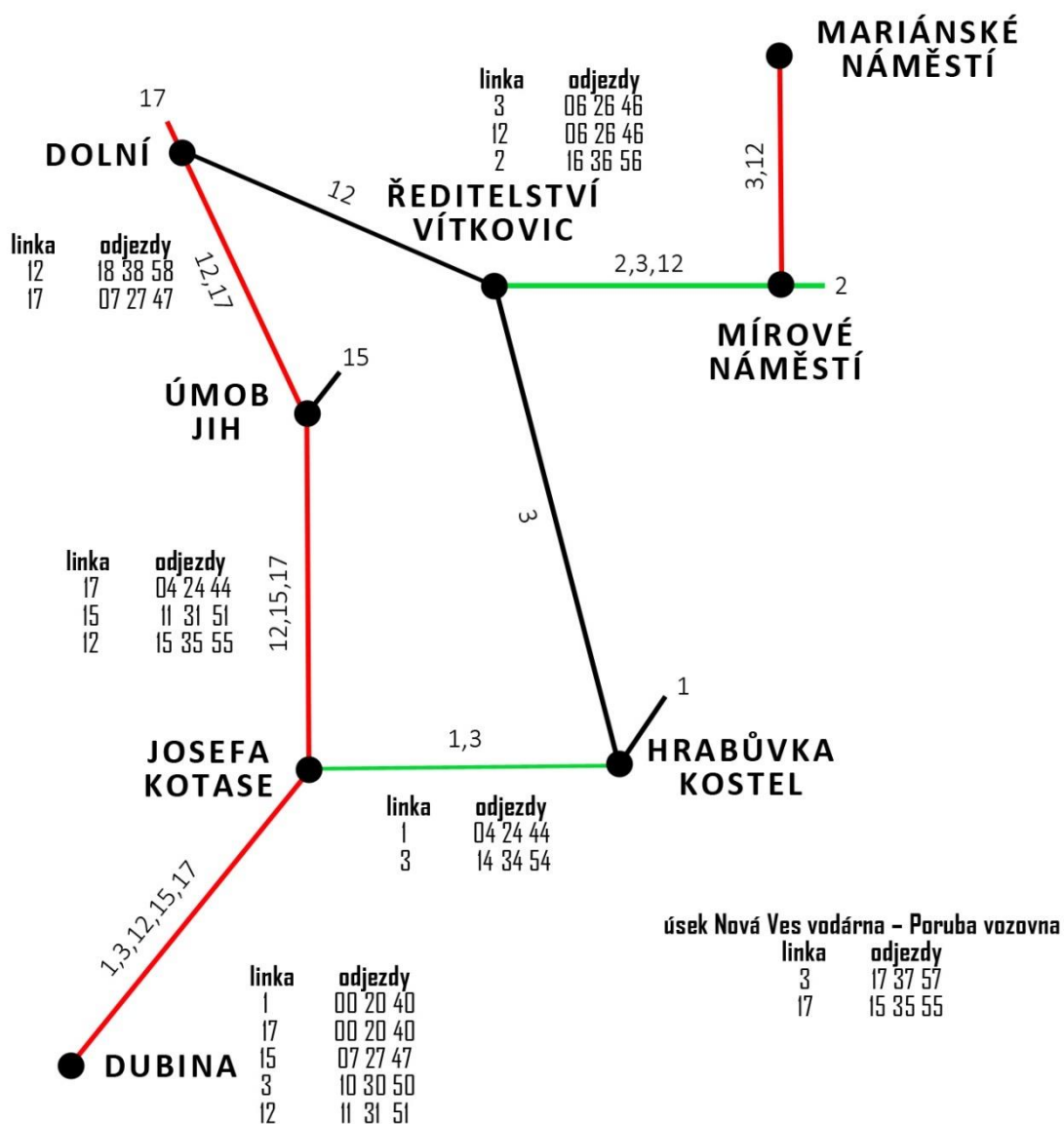
Tato varianta pracuje dále s úsekovou koordinací mezi zastávkami Ředitelství Vítovic – Mírové náměstí tak, že na tomto úseku vzniká možnost přestupu mezi spoji tramvajových linek č. 3 a č. 12 (spoje obou tramvajových linek se sjíždějí do předem určené zastávky na tomto úseku ve stejné časové poloze, přičemž vzniká možnost přestupu). Úsek Ředitelství Vítovic – Mírové náměstí je dán těmito parametry: obsluha třemi tramvajovými linkami (linky č. 2, 3 a 12), délka úseku je 1 km, doba jízdy na tomto úseku jsou 3 minuty.

V této variantě půjde o návrh co nejrovnoměrnějšího intervalu dopravy v úseku Ředitelství Vítovic – Mírové náměstí při zachování pravidelného linkového intervalu 20 minut na všech tramvajových linkách. Trasy linek č. 3 a č. 12 jsou společné na dvou úsecích v rámci tramvajové sítě Dopravního podniku Ostrava, přičemž tyto úseky na sebe bezprostředně nenavazují a doby jízdy mezi těmito úseky jsou rozdílné. Zatímco doba jízdy linky č. 3, která kopíruje částečně za zastávkou Josefa Kotase páteřní tramvajovou linku č. 1, doba jízdy ze zastávky Josefa Kotase do zastávky Ředitelství Vítovic je 10 minut, u tramvajové linky č. 12, která za zastávkou Josefa Kotase částečně kopíruje trasu páteřní tramvajové linky č. 17, je tato doba jízdy do zastávky Ředitelství Vítovic ze zastávky Josefa Kotase 11 minut. V této fázi je zřejmé, že v případě podmínky dodržení přestupní vazby mezi tramvajovými linkami č. 3 a 12 na společně pojížděném úseku Ředitelství Vítovic – Mírové náměstí, nebude dodržena pravidelnost na úseku Dubina – Josefa Kotase (přestup nastane zpravidla ze spoje linky č. 3 na spoj linky č. 12, protože na trase linky č. 3 existují zastávky, které nemají přímé spojení s centrem Ostravy). Pokud by byla zajištěna tato přestupní vazba, je možné dodržet pravidelnost obsluhy na tomto úseku, jelikož dále je tento úsek obsluhován také tramvajovou linkou č. 2, jejíž spoje by v ideálním případě byly vedeny v časových polohách umístěných v polovině časového intervalu sjíždějících se tramvajových linek č. 3 a 12.

Výhodou této varianty je zajištění pravidelné obsluhy na tomto úseku s vytvořením přestupní vazby mezi spoji tramvajových linek č. 3 a 12, nevýhodou pak nedodržení pravidelnosti na předchozích úsecích (Dubina – Josefa Kotase, Josefa Kotase – Hrabůvka kostel, Josefa Kotase – ÚMOB Jih, ÚMOB Jih – Dolní a Nová Ves vodárna – Poruba vozovna). Varianta 3.1 je zobrazena na Obrázku 8, návrhy odjezdů tramvajových linek z přestupního uzlu jsou v Tabulce 9.

Linka	Směr	Odjezd z uzlu Dubina
1	Hlavní nádraží	00
17	Vřesinská	00
15	Výškovice	07
3	Poruba vozovna	10
12	Hranečník	12

Tabulka 9: Návrh odjezdů tramvajových linek z uzlu Dubina při variantě 3.1



Obrázek 8: Vizualizace časové obsluhy společných úseků ve variantě 3.1

8.3.3.2. Varianta č. 3.2

Tato varianta je dále věnována úsekové koordinaci zejména na úseku Mírové náměstí – Mariánské náměstí, přičemž v případě zajištění přestupní vazby ze spojů jedné

z tramvajových linek č. 3 a 12 na spoje tramvajové linky č. 2, bude zajištěna také úseková koordinace na úseku Ředitelství Vítovic – Mírové náměstí (interval dopravy na tomto úseku i na bezprostředně navazujícím úseku Mírové náměstí – Mariánské náměstí by byl v tomto případě 10 minut).

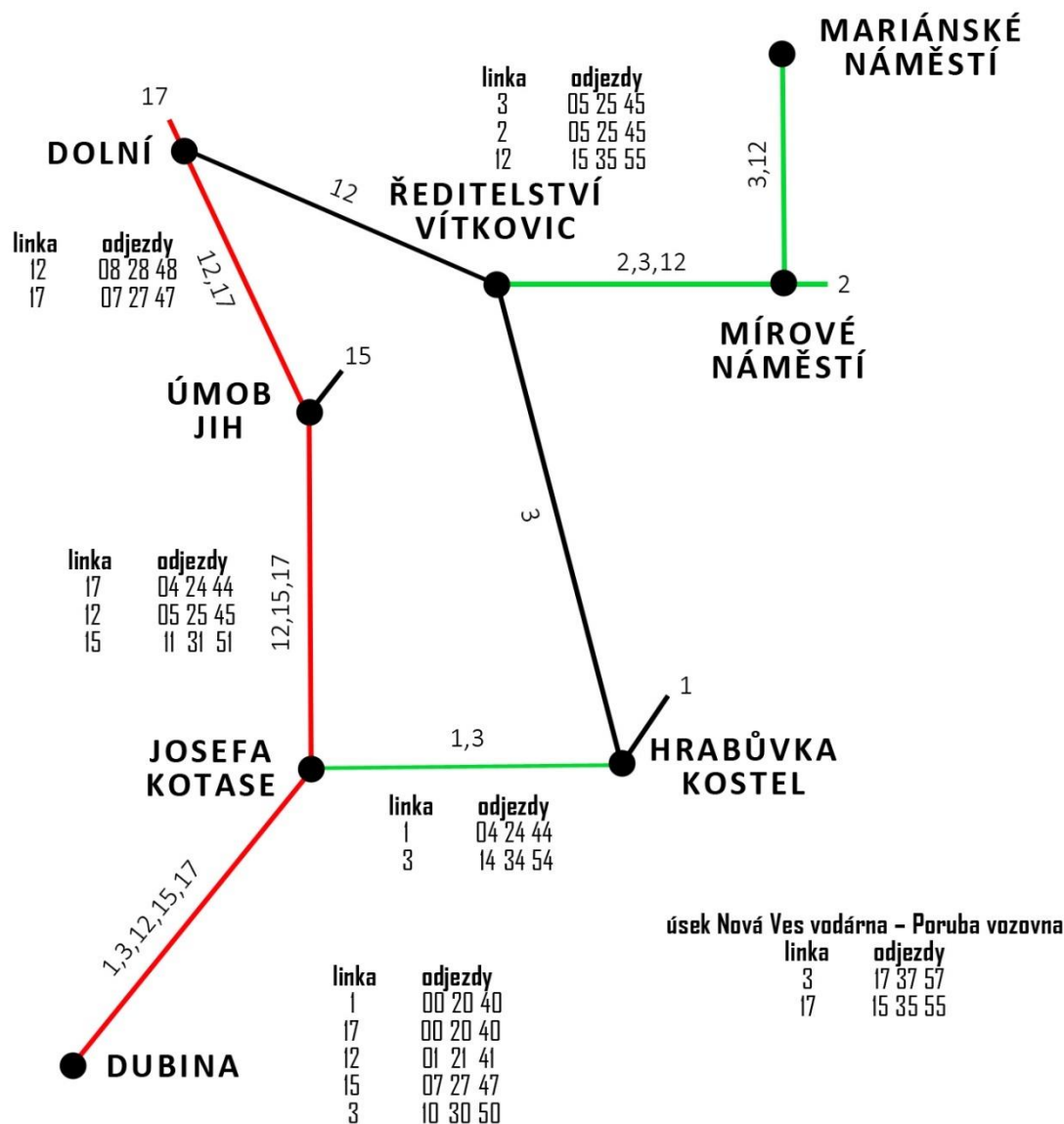
Úsek Mírové náměstí – Mariánské náměstí je dán těmito parametry: obsluha dvěma tramvajovými linkami (linky č. 3 a 12), délka úseku je 2 km, doba jízdy tramvaje na tomto úseku je 5 minut. Cílem této varianty je zajištění pravidelného intervalu dopravy na úseku Mírové náměstí – Mariánské náměstí při zachování pravidelného linkového intervalu 20 minut na všech tramvajových linkách.

Jako ideální přestupní vazba se jeví vazba přestupu ze spojů tramvajové linky č. 3 na spoje tramvajové linky č. 2, jelikož při této přestupní vazbě je zajištěna dostupnost městských částí Centrum i Poruba, navíc je možno dodržet interval dopravy tramvajových linek směřujících do Centra 10 minut. V opačném případě, ve kterém by byly vytvořeny přestupy ze spojů tramvajové linky č. 12 na spoje tramvajové linky č. 2, by byla městská část Centrum dostupná pouze ve stejný časový okamžik (jednou za 20 minut).

Výhodou této varianty je zajištění pravidelné obsluhy na tomto úseku s přestupní vazbou mezi spoji tramvajových linek č. 2 a č. 3, čímž by mohla být dodržena také pravidelnost na úseku Ředitelství Vítovic – Mírové náměstí nevýhodou této varianty je nedodržení pravidelnosti na předchozích úsecích (Dubina – Josefa Kotase, Josefa Kotase – Hrabůvka kostel, Josefa Kotase – ÚMOB Jih, ÚMOB Jih – Dolní a Nová Ves vodárna – Poruba vozovna). Varianta 3.2 je zobrazena na Obrázku 9, návrhy odjezdů tramvajových linek z přestupního uzlu jsou v Tabulce 10.

linka	směr	odjezd z uzlu Dubina
1	Hlavní nádraží	00
17	Vřesinská	00
12	Hranečník	02
15	Výškovice	07
3	Poruba vozovna	10

Tabulka 10: Návrh odjezdů tramvajových linek z uzlu Dubina při variantě 3.2



Obrázek 9: Vizualizace časové obsluhy společných úseků ve variantě 3.2

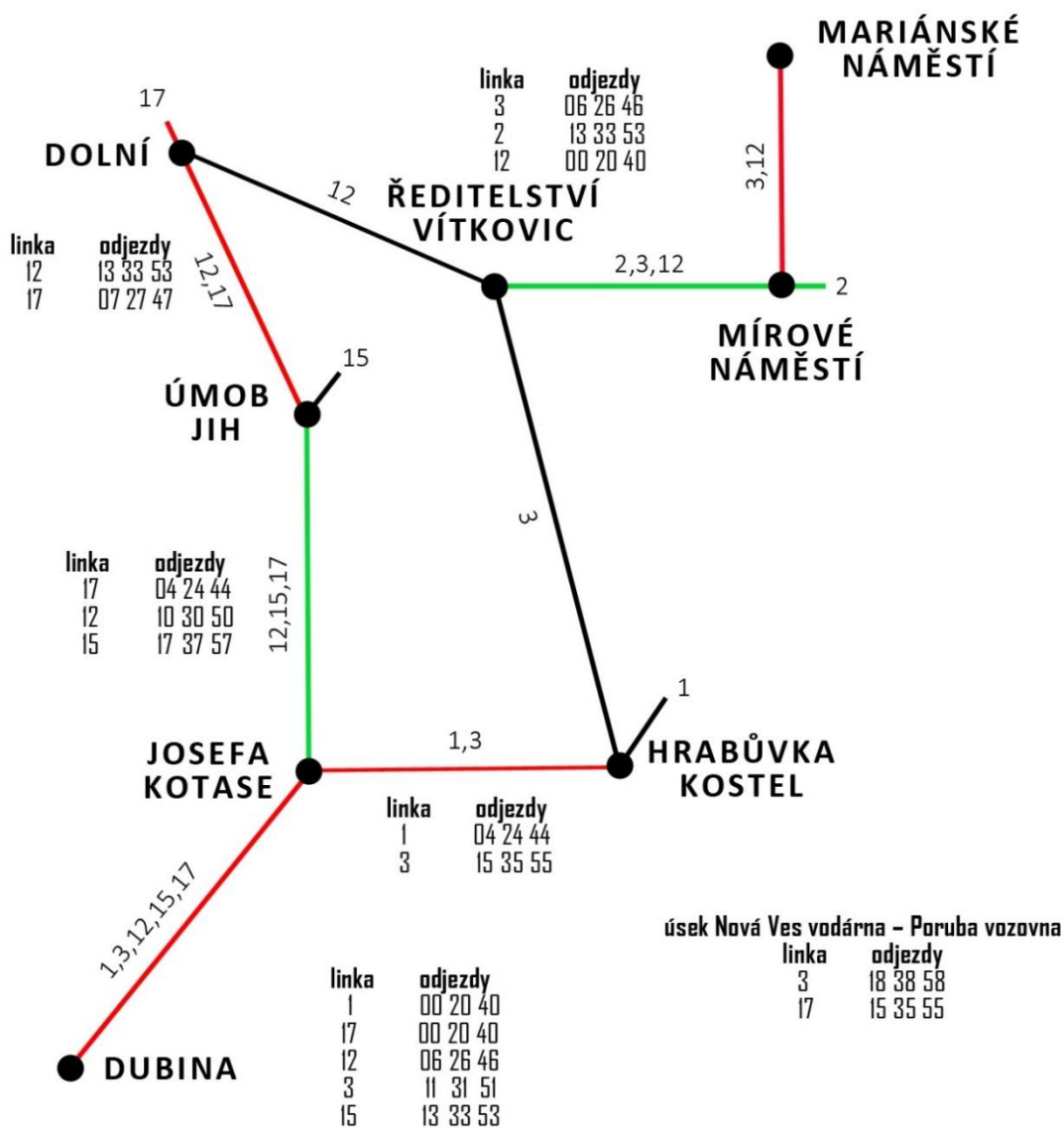
8.3.3.3. Varianta č. 3.3

Předchozí varianty byly věnovány jak úsekové koordinaci na úseku Ředitelství Vítovic – Mírové náměstí, tak na úseku Mírové náměstí – Mariánské náměstí s možnostmi přestupů mezi jednotlivými linkami č. 2, č. 3 a č. 12. Při vytvoření přestupních vazeb je však při zachování pravidelného linkového intervalu 20 minut možno dodržet na jednotlivých úsecích interval dopravy 10 minut (spoje dvou linek budou vedeny ve stejné časové poloze). Lze ale také přijmout variantu, ve které lze na úseku Ředitelství Vítovic – Mírové náměstí při třech tramvajových linkách s pravidelným linkovým intervalem 20 minut dosáhnout ještě vyšší míry pravidelnosti, úplná pravidelnost však při zachování elementární časové jednotky jedné minuty dodržena nebude (ideálním

případem intervalů dopravy jsou intervaly 7, 7 a 6 minut). Výhodou této varianty je vytvoření maximální pravidelnosti na úseku Ředitelství Vítovic – Mírové náměstí. Varianta 3.3 je zobrazena na Obrázku 10, návrhy odjezdů tramvajových linek z přestupního uzlu jsou v Tabulce 11.

Linka	Směr	Odjezd z uzlu Dubina
1	Hlavní nádraží	00
17	Vřesinská	00
12	Hranečník	06
3	Poruba vozovna	11
15	Výškovice	13

Tabulka 11: Návrh odjezdů tramvajových linek z uzlu Dubina při variantě 3.3



Obrázek 10: Vizualizace časové obsluhy společných úseků ve variantě 3.3

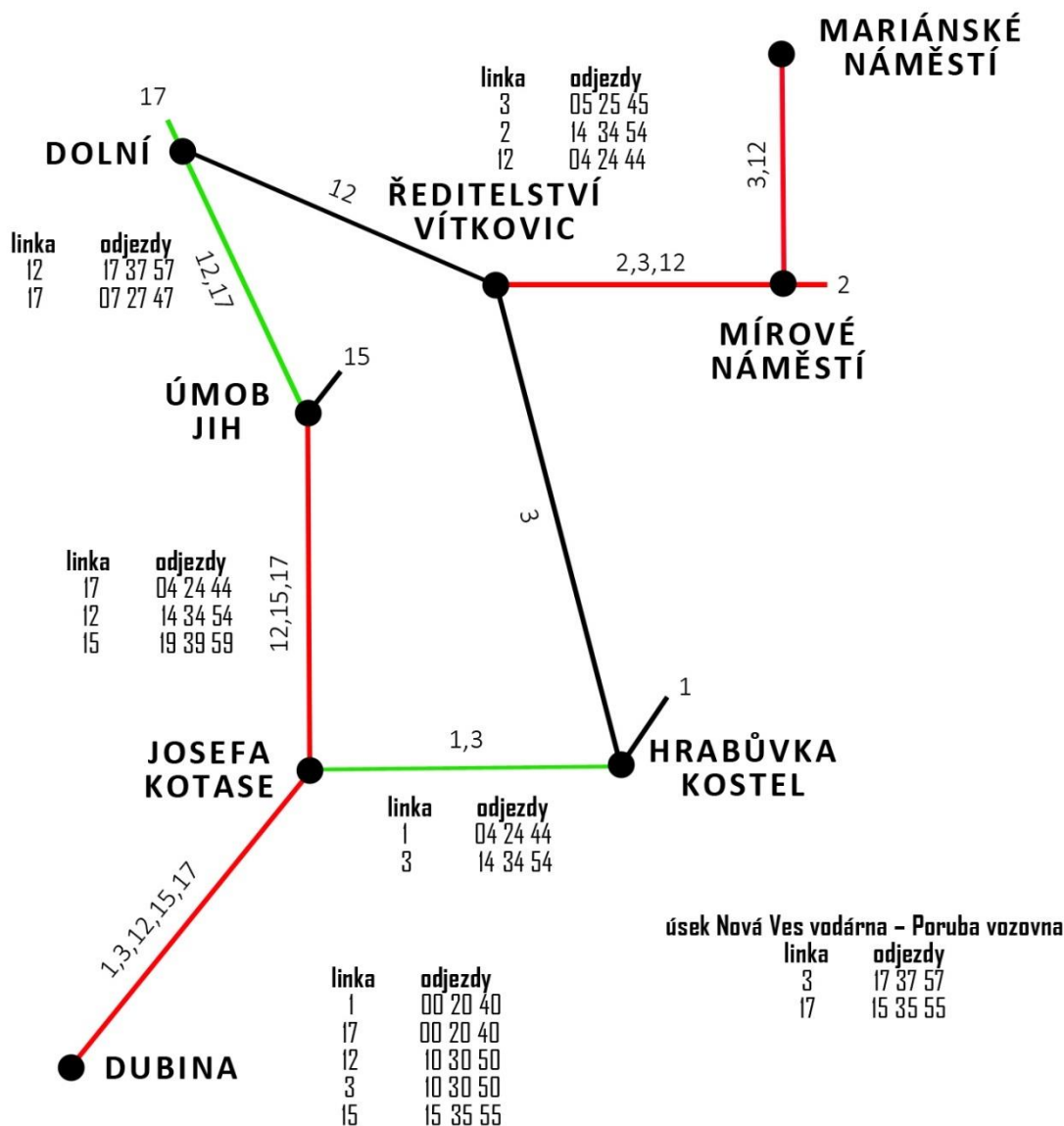
8.3.4. Varianta č. 4

Další varianta, stejně jako všechny ostatní, zajišťuje v první řadě časovou koordinaci v přestupním uzlu z autobusových linek č. 26/59 ze směru Stará Bělá a linky č. 55 ze směru Nová Bělá na páteřní tramvajové linky č. 1 směr Centrum a č. 17 směr Poruba a naopak. Tato varianta je dále rozšířena o úsekovou koordinaci na úseku ÚMOB Jih – Dolní, který obsluhují tramvajové linky č. 12 a 17 (5 společných zastávek – Hotelový dům Hlubina, ÚMOB Jih, Most Mládeže, Tylova a Dolní; délka úseku 4 km; doba jízdy 6 min.). První dvě zastávky z tohoto úseku jsou navíc obsluhovány tramvajovou linkou č. 15, nicméně vzhledem k nízké poptávce po spojích této linky nebude v této variantě brána v úvahu, jelikož nejsme schopni při zachování linkového intervalu 20 minut zajistit současnou pravidelnost spojů jak na úseku Josefa Kotase – ÚMOB Jih, tak i na úseku ÚMOB Jih – Dolní. V této variantě jde o zajištění co nejrovnoměrnějšího intervalu dopravy na úseku ÚMOB Jih – Dolní, interval obou linek bude opět zachován na 20 minutách, a tak je ideálním případem úsekové koordinace desetiminutový interval dopravy.

Výhodou této varianty je zajištění pravidelné obsluhy na úseku ÚMOB Jih – Dolní, nevýhodou pak nedodržení pravidelnosti na předchozím úseku (Josefa Kotase – ÚMOB Jih), který je obsluhován tramvajovými linkami č. 12, 15 a 17, ani na všech dalších úsecích tramvajové sítě (Ředitelství Vítkovic – Mariánské náměstí a Nová Ves vodárna – Poruba vozovna). Když nebude požadována koordinace na úseku Dubina – Josef Kotase, potom je další výhodou vytvoření pravidelné nabídky spojů na úseku Josefa Kotase – Hrabůvka kostel, jelikož úsek ÚMOB Jih – Dolní a tramvajové linky, které tento úsek obsluhují, již nemají žádné vazby na tramvajové linky č. 1 a č. 3. Varianta 4 je zobrazena na Obrázku 11, návrhy odjezdů tramvajových linek z přestupního uzlu jsou v Tabulce 12.

Linka	Směr	Odjezd z uzlu Dubina
1	Hlavní nádraží	00
17	Vřesinská	00
12	Hranečník	10
3	Poruba vozovna	10
15	Výškovice	15

Tabulka 12: Návrh odjezdů tramvajových linek z uzlu Dubina při variantě 4



Obrázek 11: Vizualizace časové obsluhy společných úseků ve variantě 4

8.3.5. Varianta č. 5

Pátá varianta, stejně jako všechny ostatní, zajišťuje v první řadě časovou koordinaci v přestupním uzlu z autobusových linek č. 26/59 ze směru Stará Bělá a linky č. 55 ze směru Nová Bělá na páteřní tramvajové linky č. 1 směr Centrum a linky č. 17 směr Poruba a naopak. Uzlová koordinace je ale doplněna také o úsekovou koordinaci na úseku Nová Ves vodárna – Poruba vozovna tak, aby příjezdy tramvajových linek č. 3 a 17 do městské části Poruba byly v pravidelném intervalu 10 minut. Společně obsluhovaný úsek v městské části Poruba je složen ze šesti nácestných zastávek, je dlouhý 4 km a doba jízdy v něm je 9 minut.

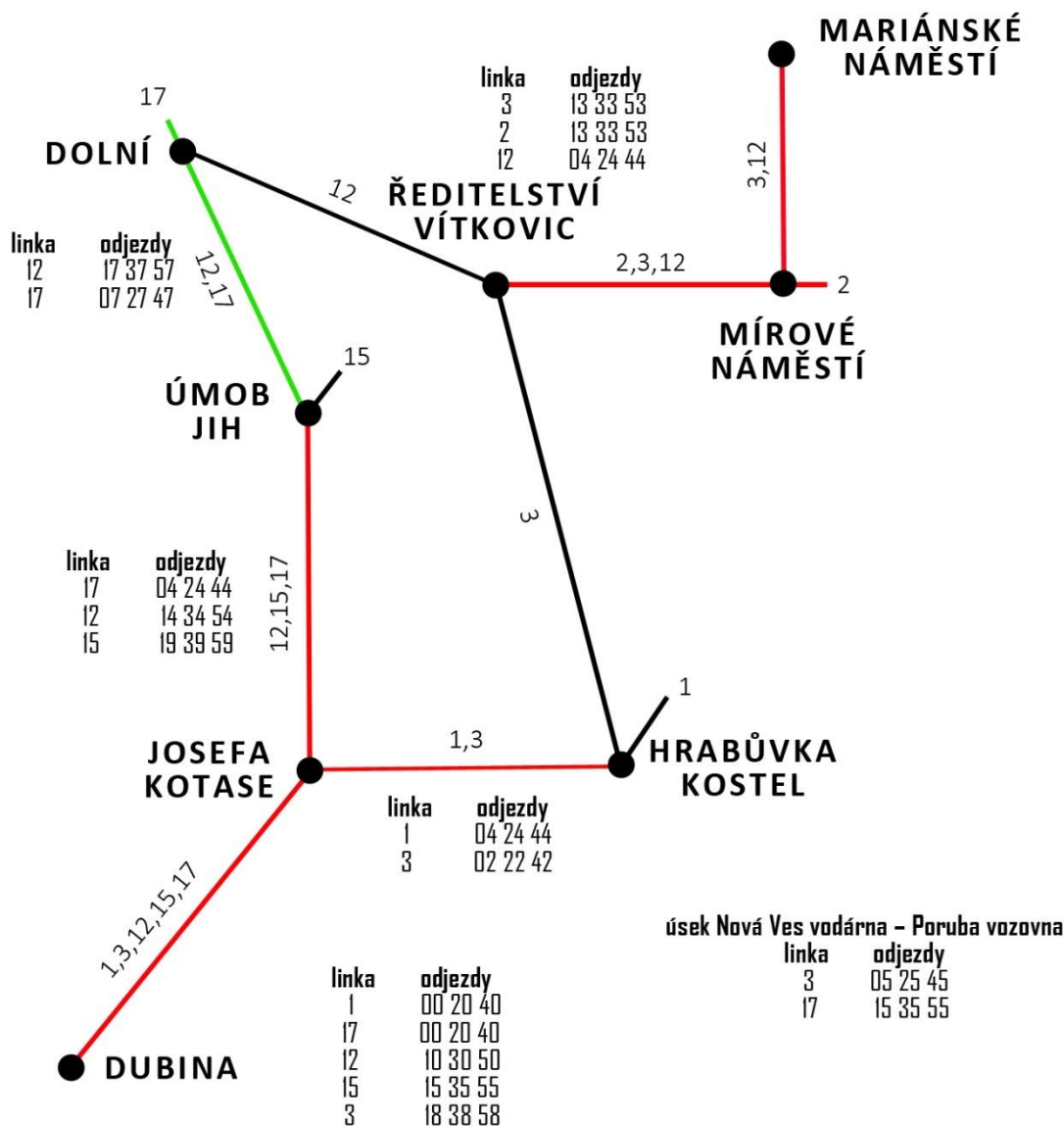
Výhodou této varianty je zajištění pravidelných příjezdů do městské části Poruba z přestupního uzlu Dubina. U odjezdů z přestupního uzlu Dubina už ale toto neplatí,

jelikož doby jízdy spojů tramvajových linek č. 3 a 17 jsou vzhledem k různým vedením tras odlišné a jejich hodnoty neumožňují dosáhnout pravidelnosti spojů jak na úseku Nová ves vodárna – Poruba vozovna, tak na úseku Dubina – Josefa Kotase. Nepravidelnost intervalů mezi spoji linek č. 3 a 17 v úseku Dubina – Josefa Kotase se přenáší i do úseku Josefa Kotase – Hrabůvka kostel, protože ve stejných časových polohách jsou na základě uzlové koordinace vedeny linky č. 1 a č. 17. Výhodou může být ovšem zajištění úsekové koordinace na úseku Josefa Kotase – ÚMOB Jih, případně ÚMOB Jih – Dolní. Varianta 5 je zobrazena na Obrázku 12, návrhy odjezdů tramvajových linek z přestupního uzlu jsou v Tabulce 13.

Linka	Směr	Odjezd z uzlu Dubina
1	Hlavní nádraží	00
17	Vřesinská	00
12	Hranečník	07/10*
15	Výškovice	14/15*
3	Poruba vozovna	18

Tabulka 13: Návrh odjezdů tramvajových linek z uzlu Dubina při variantě 5

*dva odjezdy jsou uvedeny z důvodu možného výběru preference úsekové koordinace na úseku Josefa Kotase – ÚMOB Jih, případně ÚMOB Jih – Dolní



Obrázek 12: Vizualizace časové obsluhy společných úseků ve variantě 5

8.3.6. Závěr k variantnímu řešení úsekové koordinace

Výše uvedené varianty byly konzultovány s odpovědnými pracovníky společnosti KODIS, z jejichž strany jsou upřednostňovány dvě varianty. První z nich je výše uvedená varianta č. 2, která se zabývá úsekovou koordinací spojů na úsecích Josefa Kotase – Hrabůvka kostel a Josefa Kotase – ÚMOB Jih. Současně je také upřednostněna podvarianta č. 3.2, která koordinuje spoje v úseku Ředitelství Vítkovic – Mariánské náměstí, zároveň je pak možné na úseku Ředitelství Vítkovic – Mírové náměstí přestoupit ze spojů tramvajové linky č. 3 na spoje tramvajové linky č. 2. Na tomto podkladu byl vytvořen následující model, který v kombinaci s kaskádovým přístupem přinesl optimální řešení, které bude uvedeno spolu s kaskádovým přístupem v následující kapitole 8.4.

V textu práce je uveden pouze text programu, který se vztahuje k poslednímu dílčímu optimalizačnímu výpočtu. Zbývající texty programů jsou uvedeny v přílohové části práce.

8.4. Zázpis textu programu o časové koordinaci na vybraných úsecích tramvajové sítě s použitím kaskádového přístupu v programu Xpress (pro jeden směr – z přestupního uzlu Dubina)

model usekova_koordinace

uses "mmxprs";

declarations

n = 5

spoj = 1..n

x: array(spoj) of mpvar

a: array(spoj) of real

t: array(spoj) of real

d: mpvar

w: array(1..7) of mpvar

end – declarations

a: : [20,20,20,20,20]

t: : [0,0,0,0,0]

forall (i in spoj) x(i) <= a(i)

forall (i in spoj) x(i) is_integer

forall(i in 1..7) w(i) <= 0.0001

x(1) = x(4)

t(3) + x(3) – t(1) – x(1) >= d + w(1)

t(1) + x(1) + 20 – t(3) – x(3) >= 7

t(2) + x(2) – t(4) – x(4) >= 7

t(5) + x(5) – t(2) – x(2) >= 6


```

t(4) + x(4) + 20 - t(5) - x(5) >= 7

w(4) = 0

w(3) = 0

w(5) = 0

w(2) = 0

w(6) = 0

t(3) + x(3) + 16 - t(2) - x(2) - 15 >= 7

t(2) + x(2) + 15 + 20 - t(3) - x(3) - 16 >= d + w(7)

maximize (d + sum (i in 1..7) w(i))

forall(i in spoj)writeln ("x(", i, ") = ", getsol(x(i)))

forall(i in 1..7)writeln ("w(", i, ") = ", getsol(w(i)))

writeln ("d = ", getobjval)

end - model

```

Po ukončení optimalizačního výpočtu byly dosaženy následující výsledky – časy odjezdů spojů jednotlivých linek z přestupního uzlu Dubina.

$$x(1) = 0$$

$$x(2) = 7$$

$$x(3) = 13$$

$$x(4) = 0$$

$$x(5) = 13$$

Výsledky – časové posuny odjíždějících spojů tramvajových linek byly následně dosazeny do modelu (4.1) – (4.33) a model byl opětovně vyřešen v optimalizačním software Xpress-IVE. Po vyřešení bylo získáno následující přidělení linek manipulačním kolejím.

$$wt(1,3) = 1$$

$$wt(2,2) = 1$$

$$wt(3,1) = 1$$

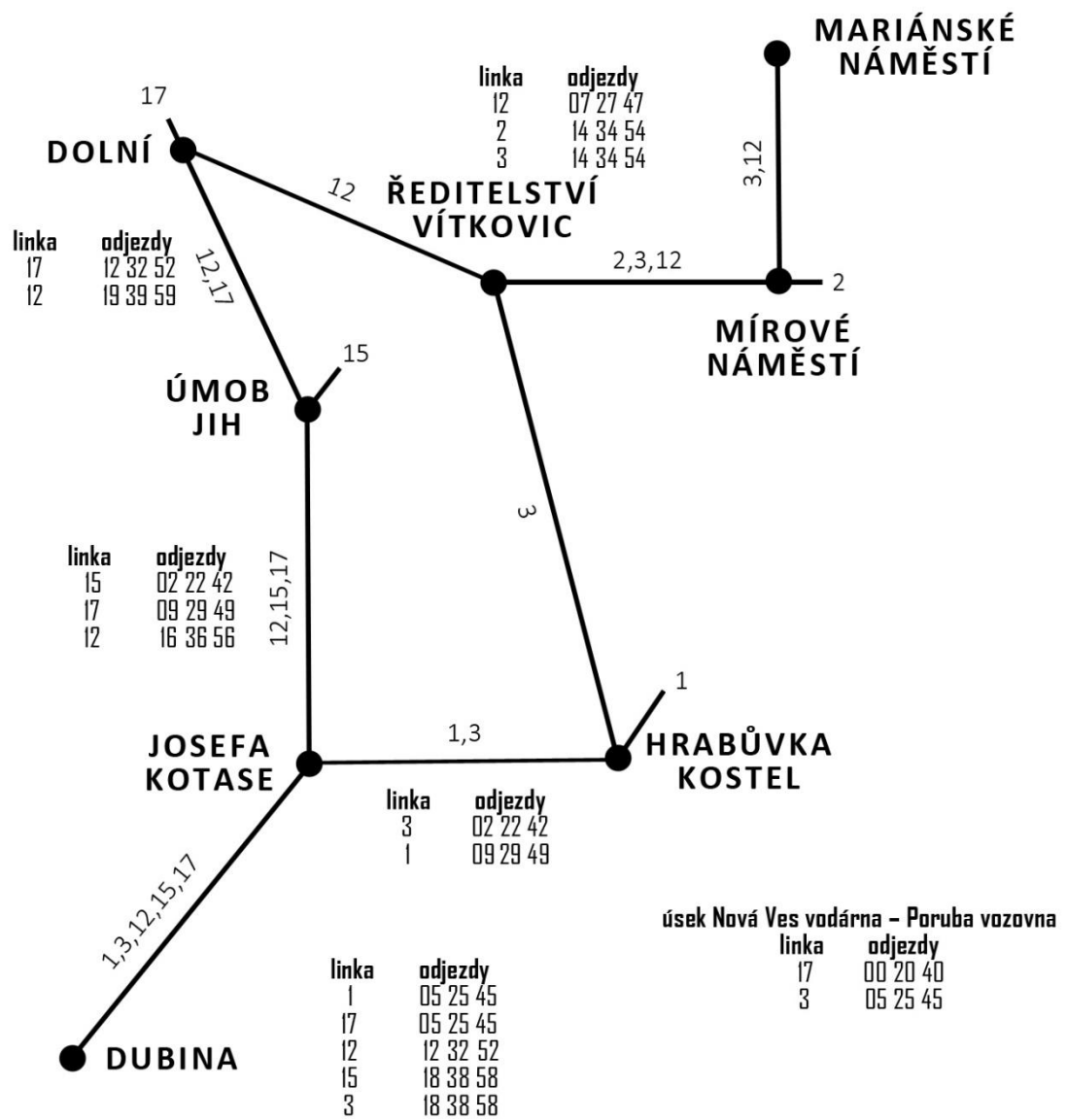
$$wt(4,1) = 1$$

$$wt(5,3) = 1$$

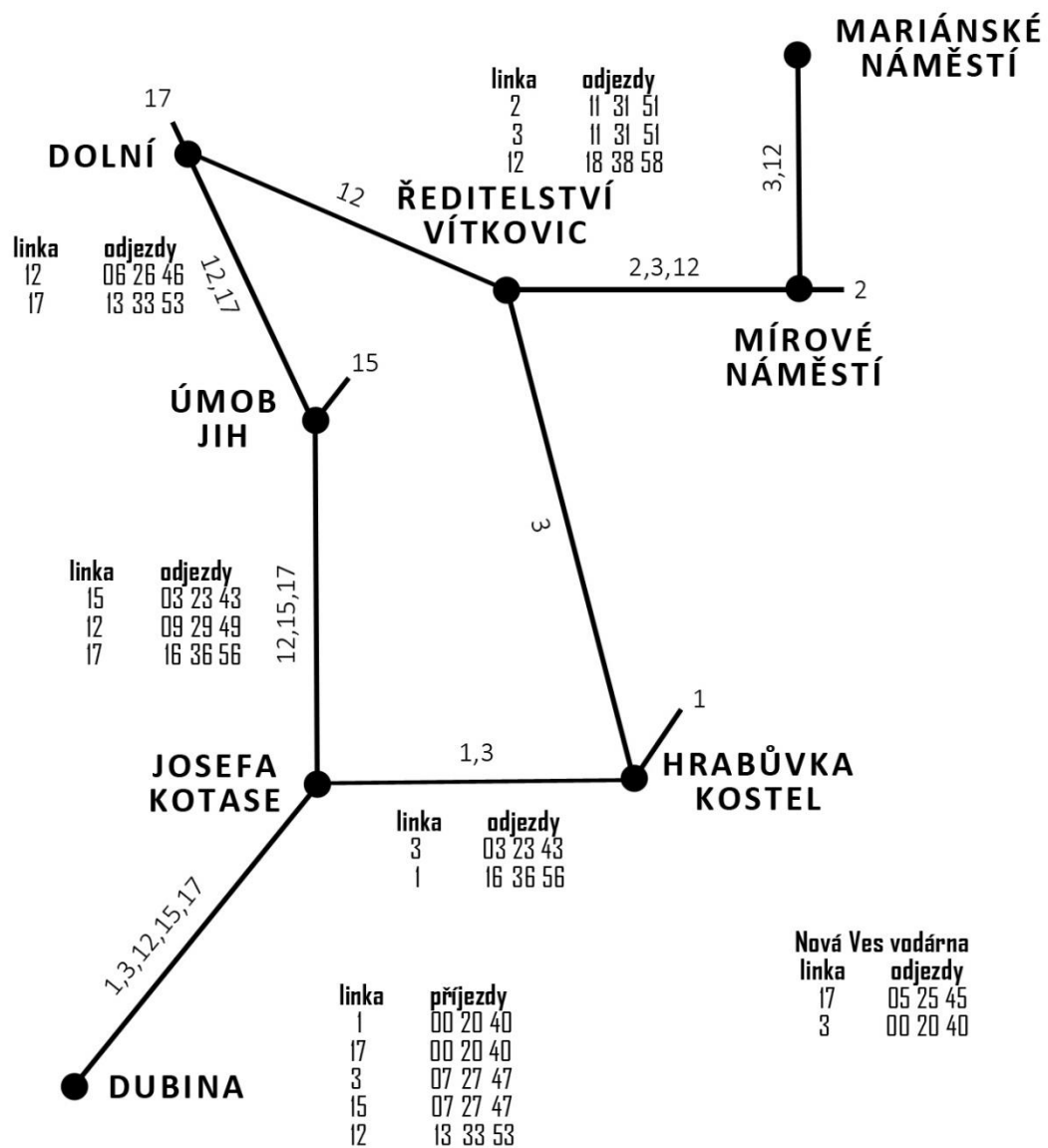
Aby byla dodržena současně také koordinace v opačném směru, musí být tyto časové posuny dodrženy také na příjezdu do přestupního uzlu Dubina. Při tomto řešení bylo dosaženo časového posunu páteřních linek 0, nicméně za účelem dodržení výsledků z předchozí optimalizační úlohy a současně zajištění pravidelnosti na koordinovaných úsecích budou všechny časové posuny tramvajových linek posunuty o hodnotu 5 tak, aby páteřní linky č. 1 a 17 odjížděly z přestupního uzlu v časových polohách 5, 25 a 45. V předchozí optimalizační úloze byly získány také výsledky časových posunů u příjezdů tramvajových linek do přestupního uzlu, které byly následně použity pro úsekovou koordinaci tramvajových linek jedoucích směrem do přestupního uzlu. Konečné výsledky jsou shrnuty v Tabulce 14 a na Obrázku 13, 14 a 15.

Tramvajová linka	Příjezdy na obratiště	Odjezdy z obratiště	Kolej
1	00 20 40	05 25 45	1
17	00 20 40	05 25 45	3
3	07 27 47	18 38 58	1
12	13 33 53	12 32 52	2
15	07 27 47	18 38 58	3

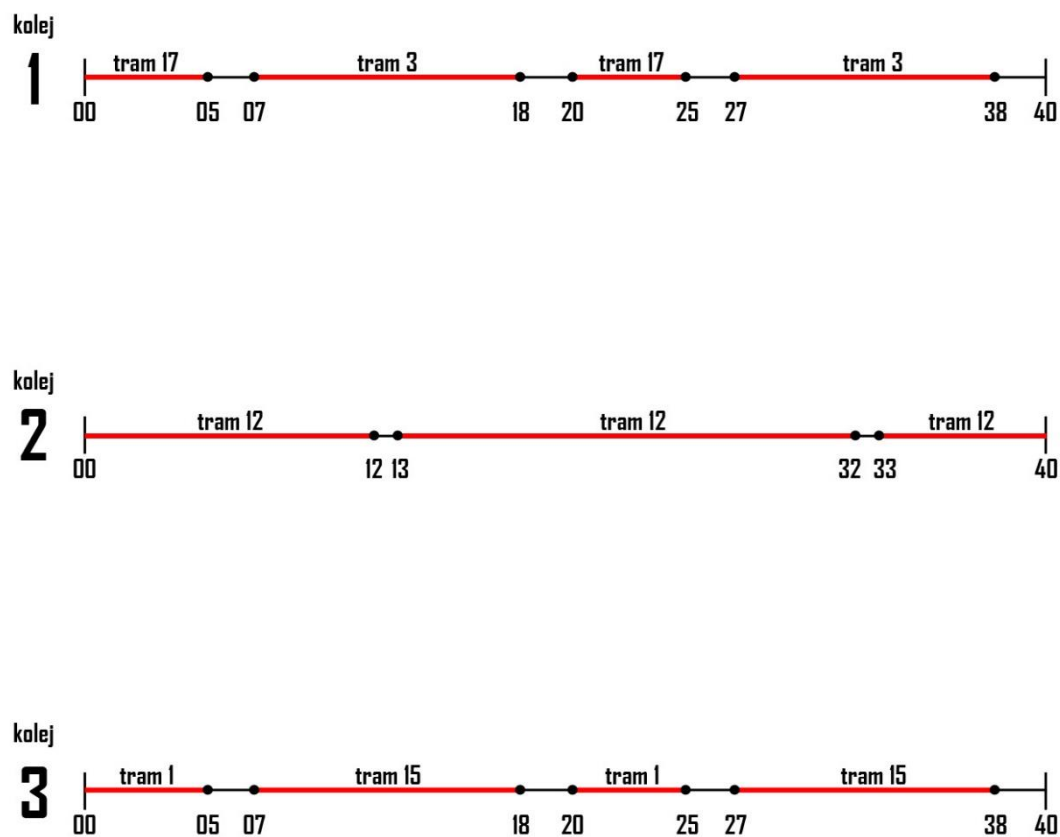
Tabulka 14: Časy příjezdů a odjezdů spojů tramvajových linek a přiřazení kolejí jednotlivým linkám na obratišti



Obrázek 13: Vizualizace konečného návrhu ze směru od přestupního uzlu Dubina



Obrázek 14: Vizualizace konečného návrhu ze směrů do přestupního uzlu Dubina



Obrázek 15: Obsazenost manipulačních kolejí na obratišti

9 Zhodnocení výsledků

V předchozí kapitole byly realizovány výpočetní experimenty s reálnými daty – časy příjezdů a odjezdů tramvajových i autobusových linek. V první řadě bylo přistoupeno k časové koordinaci v přestupním uzlu, jejíž výsledky dopadly dle očekávání a časové polohy příjezdů spojů koordinovaných linek byly posunuty do stejného časového okamžiku. Analogicky časové polohy odjezdů spojů koordinovaných linek byly posunuty do stejného časového okamžiku. Dosažené výsledky uzlové koordinace byly následně využity v navazující úsekové koordinaci, pro kterou byly společností KODIS vybrány prioritní mezistaniční úseky tramvajové sítě z navržených variant. Kaskádovým přístupem bylo poté dosaženo optimálního řešení na koordinovaných úsecích Dubina – ÚMOB Jih, Dubina – Hrabůvka kostel a Ředitelství Vítkovic – Mírové náměstí. Všem tramvajovým linkám obsluhující přestupní uzel Dubina byly pomocí nově navrženého matematického modelu také přiřazeny jednotlivé manipulační koleje na obratišti.

tramvajová linka	příjezdy na obratiště	odjezdy z obratiště	kolej
1	00 20 40	05 25 45	1
17	00 20 40	05 25 45	3
3	07 27 47	18 38 58	1
12	13 33 53	12 32 52	2
15	07 27 47	18 38 58	3

autobusová linka	příjezdy	odjezdy
26, 59	00 20 40	05 25 45
55	00 20 40	05 25 45

10 Závěr

Předložená diplomová práce se zabývá problematikou časové koordinace v přestupním uzlu Ostrava – Dubina mezi spoji tramvajových a autobusových linek Dopravního podniku Ostrava. Vzhledem ke skutečnosti, že v rámci koordinačního období dochází k pravidelnému opakování přestupních vazeb mezi jednotlivými spoji, bylo přistoupeno k určitým zjednodušením matematických modelů.

Nad rámec zadání je v práci pozornost věnována také problému tramvajových obratišť, jelikož matematický model časové koordinace v přestupním uzlu v původním stavu není schopen zachytit různá infrastrukturální omezení, a tak byl vytvořen zcela nový matematický model, který podobné problémy vyřeší a zamezí tak vzniku nepřipustného řešení. Dalším problémem, který je řešen nad rámec zadání diplomové práce, je úseková koordinace na úsecích tramvajové sítě Dopravního podniku Ostrava.

Před vlastním řešením bylo zapotřebí zmapovat a popsat všechny důležité faktory, které časovou koordinaci ovlivňují – vzdálenost stanovišť, která spoje zahrnuté do časové koordinace obsluhují, s tím spojenou přestupní dobu, a klíčovou informací je také počet přestupujících cestujících. Pro další optimalizační úlohy jsou nezbytně nutné údaje o dobách jízdy do prvních zastávek koordinovaných úseků a počtech linek na daných úsecích, u tramvajových obratišť je nutné znát počet manipulačních kolejí.

Při řešení se ukázalo, že všechny problémy lze řešit jako optimalizační problémy, které je možno vyřešit metodami lineárního programování. Optimalizační výpočty byly prováděny v optimalizačním software Xpress – IVE.

Základním výstupem z předložené práce je matematický model, který přiřazuje jednotlivým linkám manipulační koleje na obratišti a který tak zamezí vzniku nepřipustného řešení. Navržený model dokáže zohlednit i dodatečná omezení vyplývající z požadavků, že některé linky musí mít například přiřazenu danou kolej nebo že na danou kolej nesmí být přiřazen větší počet tramvajových linek. Navržený model je uveden v kapitole 4. Na základě provedeného experimentu byla prokázána plná funkčnost modelu.

Použitá literatura

- [1] DUŠEK, Vladislav: Časová koordinace spojů v přestupních uzlech s omezenou kapacitou.: Diplomová práce. Ostrava: FS VŠB – TU Ostrava, 2017. 48 s.
- [2] WINKLER, Jan: Časová koordinace spojů na úsecích dopravních sítí.: Diplomová práce. Ostrava: FS VŠB – TU Ostrava, 2011. 88 s.
- [3] CHYLA, René: Návrh řazení souprav vlaků společnosti provozující železniční osobní dopravu.: Bakalářská práce. Ostrava: FS VŠB – TU Ostrava, 2016. 45 s.
- [4] TEICHMANN, Dušan: *Optimalizace technologických procesů*.: Vyd. 2. Ostrava, 2017. 103 s. ISBN 978-80-248-3269-2.

Seznam tabulek a obrázků

Tabulka 1: Aktuální příjezdy spojů tramvajových linek do přestupního uzlu Dubina v době 12.00 – 12:20	13
Tabulka 2: Aktuální odjezdy spojů tramvajových linek do přestupního uzlu Dubina v době 12.00 – 12:20	13
Tabulka 3: Aktuální příjezdy autobusových spojů do přestupního uzlu Dubina v době 11.40 – 14.00	14
Tabulka 4: Aktuální odjezdy autobusových spojů z přestupního uzlu Dubina v době 11.40 – 14.30	14
Tabulka 5: Aktuální odjezdy autobusových spojů do směru Stará Bělá z přestupního uzlu Dubina.....	52
Tabulka 6: : Odjezdy autobusových spojů do směru Stará Bělá z přestupního uzlu Dubina po aplikaci zjednodušení	52
Tabulka 7: Návrh odjezdů tramvajových linek z uzlu Dubina při variantě 1	60
Tabulka 8: Návrh odjezdů tramvajových linek z uzlu Dubina při variantě 2	61
Tabulka 9: Návrh odjezdů tramvajových linek z uzlu Dubina při variantě 3.1	64
Tabulka 10: Návrh odjezdů tramvajových linek z uzlu Dubina při variantě 3.2	65
Tabulka 11: Návrh odjezdů tramvajových linek z uzlu Dubina při variantě 3.3	67
Tabulka 12: Návrh odjezdů tramvajových linek z uzlu Dubina při variantě 4	68
Tabulka 13: Návrh odjezdů tramvajových linek z uzlu Dubina při variantě 5	70
Tabulka 14: Časy příjezdů a odjezdů spojů tramvajových linek a přiřazení kolejí jednotlivým linkám na obrátišti.....	74
Obrázek 1: Schéma části tramvajové sítě	17
Obrázek 2: Společné úseky vybraných linek v rámci tramvajové sítě	18
Obrázek 3: Aktuální stav příjezdů a odjezdů tramvajových linek (přestupní uzel Dubina)	20
Obrázek 4: Pracovní prostředí optimalizačního software Xpress – IVE	47

Obrázek 5: Princip vytváření fiktivní výpočetní hodiny	51
Obrázek 6: Vizualizace časové obsluhy společných úseků ve variantě 1	60
Obrázek 7: Vizualizace časové obsluhy společných úseků ve variantě 2	62
Obrázek 8: Vizualizace časové obsluhy společných úseků ve variantě 3.1	64
Obrázek 9: Vizualizace časové obsluhy společných úseků ve variantě 3.2	66
Obrázek 10: Vizualizace časové obsluhy společných úseků ve variantě 3.3	67
Obrázek 11: Vizualizace časové obsluhy společných úseků ve variantě 4	69
Obrázek 12: Vizualizace časové obsluhy společných úseků ve variantě 5	71
Obrázek 13: Vizualizace konečného návrhu ze směru od přestupního uzlu Dubina	75
Obrázek 14: Vizualizace konečného návrhu ze směrů do přestupního uzlu Dubina	76
Obrázek 15: Obsazenost manipulačních kolejí na obratišti.....	77

Seznam příloh

Příloha 1.....	84
Příloha 2.....	86
Příloha 3.....	88
Příloha 4.....	90

Příloha 1: Text programu pro úsekovou koordinaci využívající kaskádový přístup – 1. iterace

model usekova_koordinace

uses "mmxprs";

declarations

n = 5

spoj = 1..n

x: array(spoj) of mpvar

a: array(spoj) of real

t: array(spoj) of real

d: mpvar

w: array(1..5) of mpvar

end – declarations

a: : [20,20,20,20,20]

t: : [0,0,0,0,0]

forall (i in spoj) x(i) <= a(i)

forall (i in spoj) x(i) is_integer

forall(i in 1..5) w(i) <= 0.0001

x(1) = x(4)

t(3) + x(3) - t(1) - x(1) >= d + w(1)

t(1) + x(1) + 20 - t(3) - x(3) >= d + w(2)

t(2) + x(2) - t(4) - x(4) >= d + w(3)

t(5) + x(5) - t(2) - x(2) >= d + w(4)

t(4) + x(4) + 20 - t(5) - x(5) >= d + w(5)

maximize (d + sum (i in 1..5) w(i))

```
forall(i in spoj)writeln ("x(",i,") = ",getsol(x(i)))  
  
forall(i in 1..5)writeln ("w(",i,") = ",getsol(w(i)))  
  
writeln ("d = ",getobjval)  
  
end – model
```

Příloha 2: Text programu pro úsekovou koordinaci využívající kaskádový přístup – 2. iterace

model usekova_koordinace

uses "mmxprs";

declarations

n = 5

spoj = 1..n

x: array(spoj) of mpvar

a: array(spoj) of real

t: array(spoj) of real

d: mpvar

w: array(1..5) of mpvar

end – declarations

a: : [20,20,20,20,20]

t: : [0,0,0,0,0]

forall (i in spoj) x(i) <= a(i)

forall (i in spoj) x(i) is_integer

forall(i in 1..5) w(i) <= 0.0001

x(1) = x(4)

t(3) + x(3) - t(1) - x(1) >= d + w(1)

t(1) + x(1) + 20 - t(3) - x(3) >= d + w(2)

t(2) + x(2) - t(4) - x(4) >= d + w(3)

t(5) + x(5) - t(2) - x(2) >= 6

t(4) + x(4) + 20 - t(5) - x(5) >= d + w(5)

w(4) = 0

```

maximize (d + sum (i in 1..5) w(i))

forall(i in spoj)writeln ("x(", i, ") = ", getsol(x(i)))

forall(i in 1..5)writeln ("w(", i, ") = ", getsol(w(i)))

writeln ("d = ", getobjval)

end – model

```

Příloha 3: Text programu pro úsekovou koordinaci využívající kaskádový přístup – 3. iterace

model usekova_koordinace

uses "mmxprs";

declarations

n = 5

spoj = 1..n

x: array(spoj) of mpvar

a: array(spoj) of real

t: array(spoj) of real

d: mpvar

w: array(1..5) of mpvar

end – declarations

a: : [20,20,20,20,20]

t: : [0,0,0,0,0]

forall (i in spoj) x(i) <= a(i)

forall (i in spoj) x(i) is_integer

forall(i in 1..5) w(i) <= 0.0001

x(1) = x(4)

t(3) + x(3) - t(1) - x(1) >= d + w(1)

t(1) + x(1) + 20 - t(3) - x(3) >= d + w(2)

t(2) + x(2) - t(4) - x(4) >= 7

t(5) + x(5) - t(2) - x(2) >= 6

t(4) + x(4) + 20 - t(5) - x(5) >= d + w(5)

w(4) = 0

$w(3) = 0$

maximize ($d + \text{sum } (i \text{ in } 1..5) w(i)$)

forall($i \text{ in } \text{spoj}$)*writeln* ("x(", i , ") = ", *getsol*($x(i)$))

forall($i \text{ in } 1..5$)*writeln* ("w(", i , ") = ", *getsol*($w(i)$))

writeln ("d = ", *getobjval*)

end – model

Příloha 4: Text programu pro úsekovou koordinaci využívající kaskádový přístup – 4. iterace

model usekova_koordinace

uses "mmxprs";

declarations

n = 5

spoj = 1..n

x: array(spoj) of mpvar

a: array(spoj) of real

t: array(spoj) of real

d: mpvar

w: array(1..5) of mpvar

end – declarations

a: : [20,20,20,20,20]

t: : [0,0,0,0,0]

forall (i in spoj) x(i) <= a(i)

forall (i in spoj) x(i) is_integer

forall(i in 1..5) w(i) <= 0.0001

x(1) = x(4)

t(3) + x(3) - t(1) - x(1) >= d + w(1)

t(1) + x(1) + 20 - t(3) - x(3) >= d + w(2)

t(2) + x(2) - t(4) - x(4) >= 7

t(5) + x(5) - t(2) - x(2) >= 6

t(4) + x(4) + 20 - t(5) - x(5) >= 7

```

w(1) <= t(3) + x(3) - t(1) - x(1)

w(2) <= t(1) + x(1) + 20 - t(3) - x(3)

w(4) = 0

w(3) = 0

w(5) = 0

maximize (d + sum (i in 1..5) w(i))

forall(i in spoj)writeln ("x(", i, ") = ", getsol(x(i)))

forall(i in spoj)writeln ("t(", i, ") = ", getsol(t(i)))

forall(i in 1..5)writeln ("w(", i, ") = ", getsol(w(i)))

writeln ("d = ", getobjval)

writeln(getsol(t(3) + x(3) - t(1) - x(1)))

writeln(getsol(t(1) + x(1) + 20 - t(3) - x(3)))

end - model

```